



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝVOJ PROCESNÍCH PARAMETRŮ TECHNOLOGIE
SELECTIVE LASER MELTING PRO VÝROBU
TENKOSTĚNNÝCH DÍLŮ Z PRÁŠKOVÉHO ŽELEZA**

DEVELOPMENT OF PROCESS PARAMETERS OF SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY FOR THE
PRODUCTION OF THIN-WALLED IRON PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Šreibr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Vít Šreibr
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj procesních parametrů technologie Selective laser melting pro výrobu tenkostěnných dílů z práškového železa

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Selective laser melting patří mezi nejrozšířenější aditivní technologie 3D tisku kovových materiálů. Jako jedna z mála výrobních technologií umožňuje realizovat komplexní tvary z práškových kovů, jako např. z titanu, hliníku, oceli nebo mědi. Kromě těchto materiálů je možné zpracovávat i železo, což přináší nové možnosti v konstrukci strojů využívajících elektromagnetismu.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je objasnit vliv procesních parametrů na rozměrovou přesnost a mechanické vlastnosti tenkostěnných struktur z čistého železa se zaměřením na elektromagnetické aplikace.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat hlavní procesní parametry,
- navrhnout experimenty pro objasnění vlivu procesních parametrů na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu
- zjištění mechanických vlastností železa zpracovaného laserem
- realizace dílu pro konkrétní aplikaci.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, iv, 266 s. : obr., čb. fot. tabulky, grafy. ISBN 978-3-8383-1794-6.

DUDA, Thomas a L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. IFAC PapersOnLine [online]. Elsevier, 2016, 49(29), 103-110 [cit. 2017-10-27]. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. ISSN 2405-8963.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zpracováním čistého železa technologií Selective laser melting, jakožto materiálu s dobrými elektromagnetickými vlastnostmi. Hlavní řešenou oblastí je optimalizace výroby tenkostěnných vzorků, u nichž je sledován vliv procesních parametrů na tloušťku a kvalitu povrchu stěn. Kromě kolmých stěn jsou zkoumány také stěny stavěné pod úhlem 45°. Další fází práce je stanovení procesních parametrů pro objemová tělesa s cílem dosažení co nejnižší porozity a vysoké kvality povrchu. Důležitou částí výzkumu je aplikace získaných poznatků při výrobě vzorků určených k testování magnetických vlastností a také dílu pro konkrétní aplikaci. Poznátky se týkají nejen nastavení parametrů tisku, ale také tepelného zpracování a jeho vlivu na magnetické a mechanické vlastnosti materiálu. Mechanické vlastnosti byly stanoveny na základě tahových zkoušek a zkoušek tvrdosti. Veškeré vzorky byly vyrobeny na zařízení SLM 280^{HL} pomocí 400W ytterbiového laseru.

KLÍČOVÁ SLOVA

SLM, Selective laser melting, čisté železo, tenkostěnné vzorky, magnetické vlastnosti

ABSTRACT

The thesis deals with the processing of pure iron by Selective laser melting technology as a material with good electromagnetic properties. The main area is the optimization of the production of thin-walled samples, which monitor the influence of process parameters on the thickness and quality of the wall surfaces. In addition to the perpendicular walls, walls built at an angle of 45° are also examined. Another phase of the thesis is the determination of process parameters for bulk bodies to achieve the lowest porosity and high surface quality. An important part of the research is the application of acquired knowledge in the production of samples designed to test magnetic properties as well as part for a specific application. These considerations concern not only the setting of the printing parameters, but also the heat treatment and its influence on the magnetic and mechanical properties of the material. Mechanical properties were determined by tensile tests and hardness tests. All samples were made on a SLM 280^{HL} using a 400W ytterbium laser.

KEY WORDS

SLM, Selective laser melting, pure iron, thin-walled samples, magnetic properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠREIBR, V. *Vývoj procesních parametrů technologie Selective laser melting pro výrobu tenkostěnných dílů z práškového železa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 92 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za vedení mé práce, věcné rady a připomínky, díky nimž se mi podařilo dosáhnout požadovaných výsledků. Také bych rád vyjádřil dík za možnost pracovat v laboratořích školy a využívat tak zařízení, kterými Fakulta strojního inženýrství disponuje. V poslední řadě děkuji svým blízkým za jakýkoliv druh podpory, jež mi byla po čas studia poskytnuta.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem danou práci vypracoval samostatně pod odborným dohledem a s využitím zdrojů informací a obrázků, které řádně cituji.

V Brně dne

.....

Vít Šreibr

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
2.1 Výroba prášku pomocí atomizace	14
2.2 Zkoumání vlastností „single“ návarů	15
2.3 Zkoumání vlastností objemových dílů	16
2.4 Zpracování čistého železa aditivní technologií	17
2.4.1 Song – zpracování čistého železa pomocí SLM	17
2.4.2 Paloušek – zpracování čistého železa	18
2.4.3 Simchi – zkoumání tvrdosti	19
2.4.4 Murali – Zkoumání tvrdosti	20
2.5 Vliv tepelného zpracování na tvrdost	21
2.6 Drsnost povrchu SLM dílů	22
2.7 Geometrická přesnost tenkostěnných dílů	26
2.8 Magnetické vlastnosti SLM vzorků	27
2.9 Vliv tepelného zpracování na magnetické vlastnosti	29
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1 Analýza problému	32
3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	32
3.3 Podstata a cíle diplomové práce	33
4 MATERIÁL A METODY	34
4.1 Metalurgický prášek	34
4.2 Použité zařízení pro výrobu vzorků	35
4.3 Tenkostěnné vzorky	35
4.4 Test TS vzorků tvořených jedním návarem	36
4.4.1 Test TS vzorků č. 1	36
4.4.2 Test TS vzorků č. 2	37
4.4.3 Test TS vzorků č. 3	37
4.5 Test TS tvořených dvojím skenováním laseru	37
4.6 Statistický test	38
4.7 Test šikmých TS vzorků	40
4.8 Objemové vzorky	40
4.8.1 Test objemových vzorků č. 1	40
4.8.2 Test objemových vzorků č. 2	41
4.8.3 Test objemových vzorků č. 3	41
4.8.4 Test objemových vzorků č. 4	41
4.9 Testy magnetických vlastností	41
4.10 Zalévání vzorků	43
4.11 Mechanické vlastnosti	43
5 VÝSLEDKY	44
5.1 Distribuce částic použitého prášku	44
5.2 Test objemových vzorků č. 1	46
5.3 Test TS vzorků č. 1	47
5.4 Test TS vzorků č. 2	49
5.5 Test TS vzorků č. 3	51
5.6 Test TS vzorků tvořených dvojím skenováním laseru	55
5.7 Statistický test	57
5.8 Test šikmých TS vzorků	60

5.9 Test objemových vzorků.....	63
5.10 Testy magnetických vlastností.....	66
5.11 Tahová zkouška	73
6 DISKUZE	74
7 ZÁVĚR	76
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	77
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	79
10 SEZNAM OBRÁZKŮ	80
11 SEZNAM TABULEK.....	82
12 SEZNAM PŘÍLOH.....	83
PŘÍLOHA A.....	84
PŘÍLOHA B	85
PŘÍLOHA C	90
PŘÍLOHA D	92
PŘÍLOHA E	95
PŘÍLOHA F	96

1 ÚVOD

Selective laser melting (SLM) je aditivní technologie umožňující výrobu kovových součástí vrstvu po vrstvě. Tato metoda je v průmyslu využívána při stavbě dílů majících komplikovaný tvar nebo jsou tvořeny strukturou. Takové výrobky nachází uplatnění v kosmickém, leteckém, či automobilním průmyslu, popř. v medicíně, tedy v odvětvích vyžadujících vysokou kvalitu produktu. Výrobky vytvořené pomocí SLM dosahují mechanických vlastností srovnatelných s konvenčně vyráběnými díly. Velký vliv na pevnost materiálu má porozita, tedy množství dutin vzniklých při procesu výroby. Proto je před zpracováním nového materiálu důležitá fáze optimalizace vstupních parametrů tisku, jako jsou rychlost skenování, výkon laseru, tloušťka vrstvy nanášeného prášku aj. Tato fáze zahrnuje několik experimentů, mezi které patří test jednotlivých návarů, zkoumání porozity objemových, popř. tenkostěnných vzorků a také zjišťování drsnosti povrchu dílů. Krom dosažení vysoké relativní hustoty je důležitá také co největší redukce celkového výrobního času a výsledná geometrická přesnost.

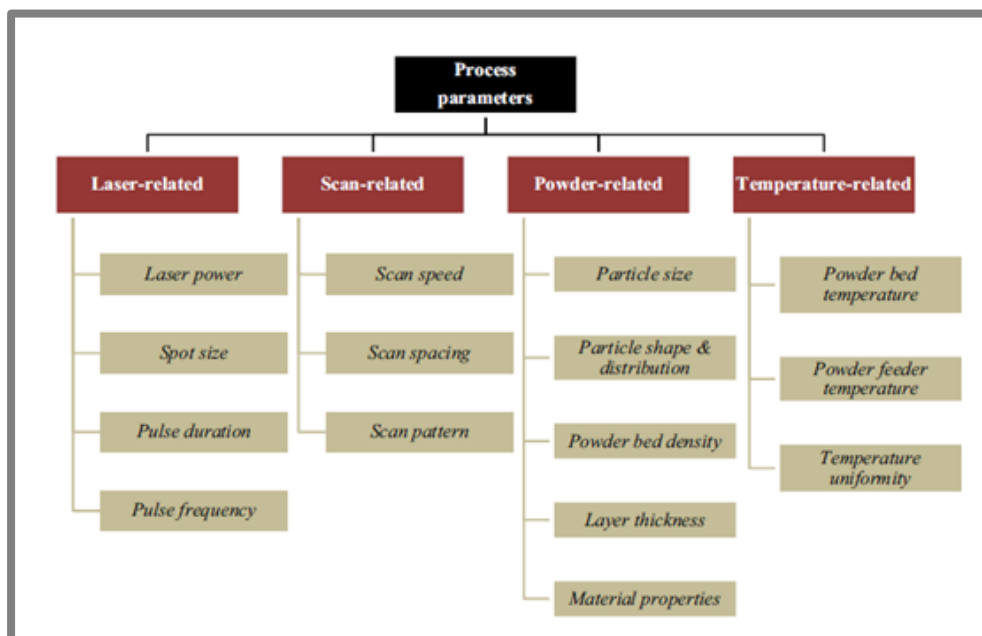
V průmyslu existuje řada strojů využívajících elektromagnetické vlastnosti látek, např. magnetoreologické tlumiče. Při konstrukci jader tlumičů je kladen důraz na potlačení vířivých proudů, čehož lze dosáhnout vytvořením skládaného jádra tvořeného vzájemně izolovanými lamelami [1]. Pro tyto aplikace se nabízí možnost zpracování prášku čistého železa pomocí technologie SLM, což je předmětem této práce. Základní myšlenkou výzkumu je takové nastavení procesních parametrů, které zajistí skvělé magnetické a zároveň mechanické vlastnosti dílů, a to jak pro objemové, tak pro tenkostěnné vzorky.



Obr. 1-1 Jádra magnetoreologických tlumičů vyrobených pomocí SLM [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Kvalita dílu vyrobeného technologií SLM je úzce spojena s nastavením procesních parametrů. Ty mají vliv na výslednou porozitu, kvalitu povrchu a mechanické vlastnosti součásti. Na obr. 2-1 je vidět rozdělení technologických parametrů.

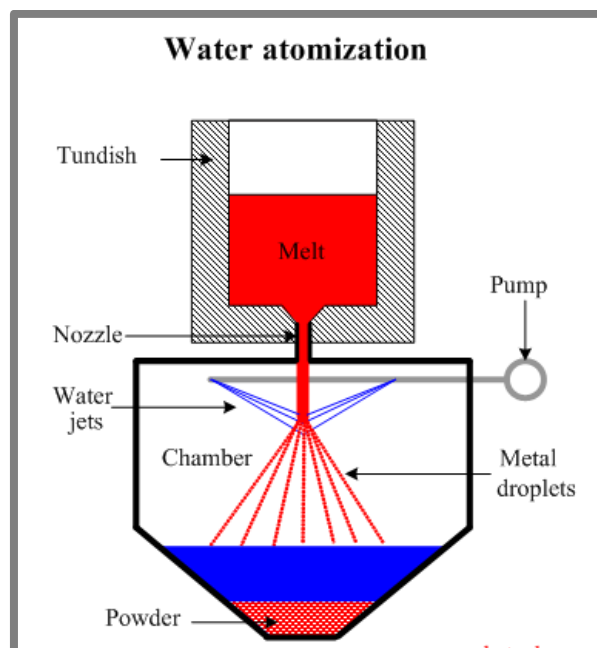


Obr. 2-1 Rozdělení procesních parametrů SLM [2]

Tyto parametry je nutné stanovit pro každý nově zpracovávaný materiál, tedy i u prášku z čistého železa, který je předmětem této práce. Obvykle se postupuje od zkoumání jednotlivých návarů, přes objemové vzorky až po tenkostěnné díly.

2.1 Výroba prášku pomocí atomizace

Prášek vyrobený pomocí atomizace je v aditivních technologiích nejvíce používaný. Proces atomizace je naznačen na obr. 2-2 [3]. Roztavený kov je tryskou vháněn ze zásobníku do komory, kde je vystaven silnému proudu média, kterým bývá voda, či plyn. Tím dochází k rozprašování kovových kapek uvnitř komory, které za letu chladnou. Na dně komory se z nich formují částice prášku. Prášek je následně vysušen a připraven k exportu.

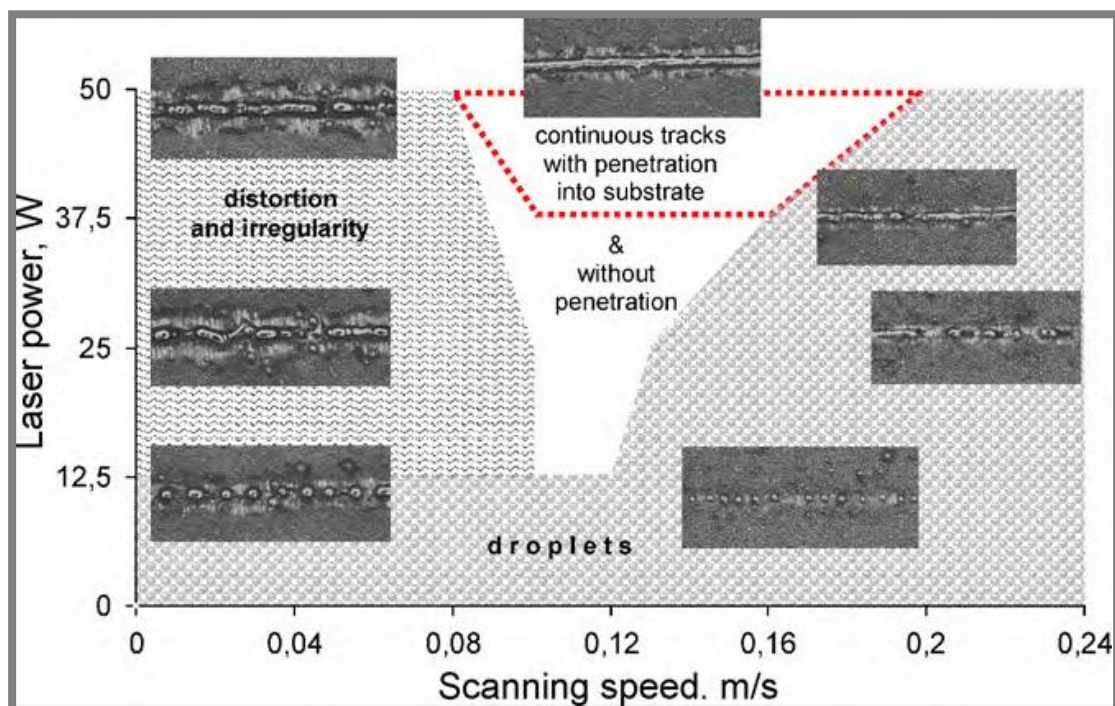


Obr. 2-2 Schéma výroby prášku pomocí atomizace [3]

Prášek vyrobený pomocí vodní atomizace dosahuje horší kvality. Částice jsou nepravidelné a mají tendenci se shlukovat. Naopak při použití atomizace plynem se tvar částic blíží sférickému, což umožňuje lepší zpracování pomocí 3D tisku. Prášek je lépe nanášen a nedochází k jeho ulpívání na stěnách nanášecího zařízení, či zásobníku.

2.2 Zkoumání vlastností „single“ návarů

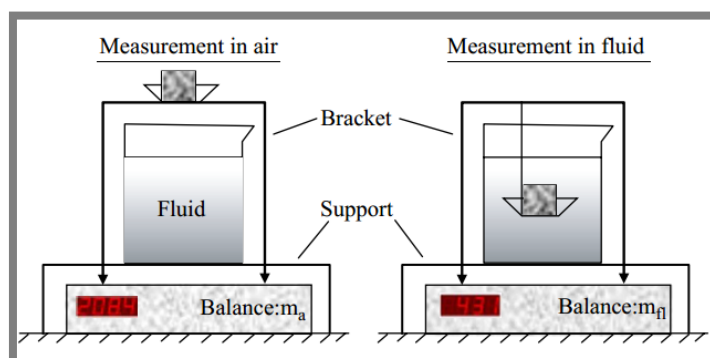
Vlastnosti dílu vytvořeného technologií SLM závisí na vlastnostech jednotlivých svarů a vrstev. Proto je nutné porovnat vzhled svaru při různých rychlostech skenování a výkonech laseru pro vytvoření procesní mapy. Z obr. 2-3 je patrné, že při nízkých rychlostech skenování a vysokých výkonech dochází k tvorbě přerušovaného a nepravidelného svaru. Při nízkých výkonech vznikají namísto kontinuálního návaru drobné kapky. Jedná se o tzv. balling efekt. K tomuto jevu dochází v případě, kdy roztavený materiál nedostatečně smáčí podkladový substrát díky povrchovému napětí. Dalším vstupním parametrem je druh módu laseru. Pokud laser skenuje v pulsujícím módu, dochází k odpařování taveniny, což potlačuje vznik balling efektu a zlepšuje mechanické vlastnosti tištěného dílu. Bylo také zjištěno, že vysoké výkony laseru zajišťují dobré propojení jednotlivých vrstev díky dosažení vyšší teploty svarové lázně [4].



Obr. 2-3 Procesní mapa „single“ návarů [5]

2.3 Zkoumání vlastností objemových dílů

Porozita je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Zkoumá se na objemových vzorcích, které mají podobu kvádrů. Ke zjištění pórovitosti, popř. relativní hustoty, jsou použitelné různé metody. Archimedova metoda (obr. 2-4) slouží k výpočtu relativní hustoty ze zjištěných hmotností před a po ponoření tělesa do kapaliny [6]. Výsledek může být zkreslený při měření vzorků s vysokou pórovitostí na povrchu, kdy dochází k zatékání kapaliny do tělesa.



Obr. 2-4 Archimedova metoda stanovení relativní hustoty [6]

Další možností je zkoumání porozity na metalografickém výbrusu pomocí optického mikroskopu. Jedná se o destruktivní metodu, která udává informaci o množství pórů pouze v daném řezu. Zároveň je časově nákladná, vzhledem k přípravě metalografického výbrusu. Ziółkowski [7] se ve své práci zabývá použitím počítačové tomografie (dále CT) pro sledování pórovitosti vzorků z nerezové oceli vytvořených na SLM. Metoda umožňuje vytvoření virtuálního 3D modelu dílu a zkoumání množství, velikosti a orientaci defektů. Kvalita modelu je dána velikostí voxelu, tedy čím menší

zkoumaný vzorek, čím většího voxelového rozlišení je možno dosáhnout. Jedná se o finančně nákladnou metodu v porovnání s předchozími dvěma způsoby.

2.4 Zpracování čistého železa aditivní technologií

V této podkapitole jsou zmíněny práce autorů, kteří se již zabývali zpracováním prášku s vysokým obsahem železa metodou Selective laser melting, popřípadě Selective laser sintering.

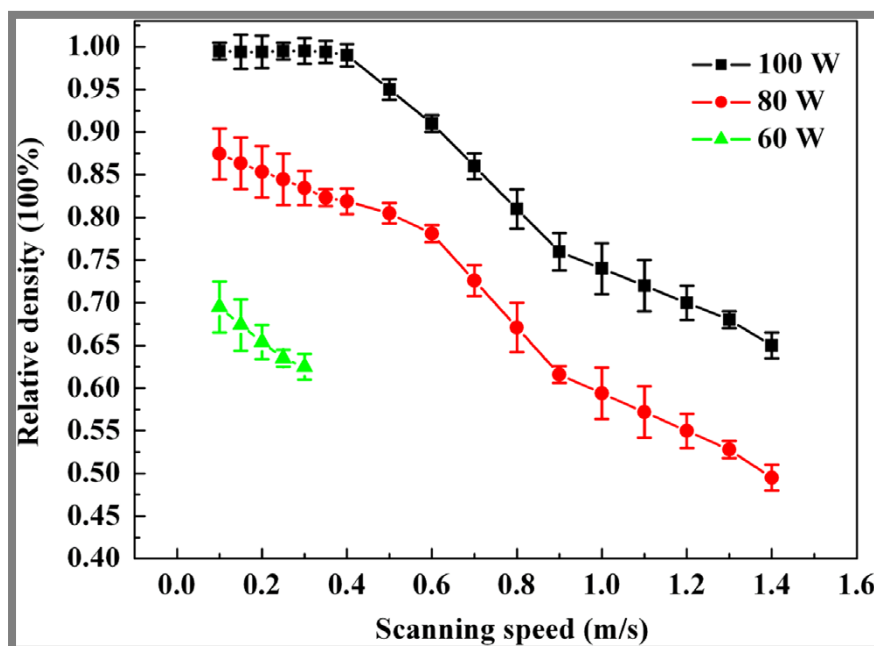
2.4.1 Song – zpracování čistého železa pomocí SLM

Práce Songa [8] zkoumá mikrostrukturu a tahové vlastnosti dílů vyrobených z čistého železa pomocí SLM. V tabulce 2-1 jsou vypsány procesní parametry, při kterých byly vyrobeny objemové vzorky, u nichž byla dále sledována porozita.

Tabulka 2-1 Procesní parametry

Majoritní velikost zrna	20 μm
Typ laseru, mód a průměr svazku	YLR, single, 34 μm
Výkon	60, 80, 100 W
Rychlosti skenování	200-1400 mm/s
Hatch distance	40 μm
Tloušťka vrstvy	50 μm

V práci není uveden typ strategie skenování. Na obr. 2-5 jsou znázorněny nastavované výkony a rychlosti laseru a zároveň dosažené hodnoty relativní hustoty.



Obr. 2-5 Procesní mapa čistého železa [8]

Na základě této procesní mapy byly vybrány optimální hodnoty vstupních parametrů (výkon laseru 100 W při rychlostech skenování od 0,1 do 0,4 m/s) k vytvoření pěti

vzorků pro tahovou zkoušku. Výsledky tahové zkoušky pro jednotlivé rychlosti jsou znázorněny na obr. 2-6.

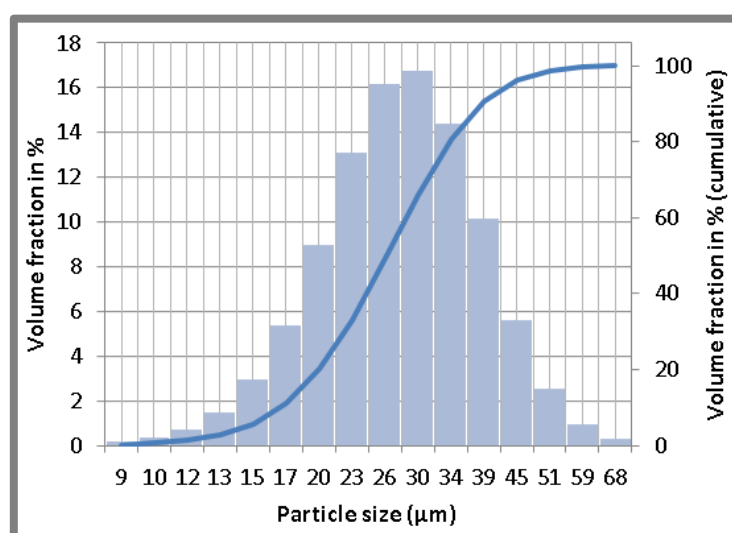
V (m/s)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	UTS (MPa)
0.27	205.6 ± 16	245.8 ± 17	354.2 ± 18
0.33	208.7 ± 16	256.5 ± 17	356.6 ± 22
0.35	210.5 ± 18	285.4 ± 20	402.7 ± 24
0.4	215.8 ± 20	305.3 ± 22	411.5 ± 25
Reference [29]	125–293	98–166	158–225

Obr. 2-6 Výsledky tahové zkoušky [8]

Položka „Reference“ znázorňuje pro porovnání hodnoty materiálů s vysokým obsahem železa. Ty jsou takřka dvakrát menší, což je dáno vysokým poměrem chladnutí při zpracování prášku pomocí laseru, který vede k dosažení jemné mikrostruktury s vysokou hustotou dislokací. Jak je patrné, s rostoucí rychlostí skenování rostou také hodnoty tahových veličin.

2.4.2 Paloušek – zpracování čistého železa

Řešená diplomová práce navazuje na výzkum Palouška [9], který ve svém článku publikuje výsledky testů prováděných na vzorcích z čistého železa produkovaných technologií SLM. V práci jsou uvedeny výsledky granulometrie, které lze vidět na obr. 2-7 v podobě grafu závislosti objemové koncentrace na velikosti zrna. Tento test byl proveden na zařízení Horiba LA-960 a potvrzuje hodnoty udávané výrobcem prášku.



Obr. 2-7 Výsledky granulometrie [9]

Dále jsou zde prezentovány výsledky testů porozity, které byly prováděny na objemových vzorcích o rozměrech $5 \times 5 \times 5$ mm. Byl použit YLR-Faser-Laser s průměrem svazku 80 μm. Výkon laseru byl nastaven v rozsahu 100, 200, 300 a 400 W. Rychlost skenování rostla od 200 po 500, 800, 1100 až 1400 mm/s. Hatch distance byla měněna mezi 90, 120 a 150 μm. Tloušťka vrstvy byla konstantní, a to 50 μm. Maxi-

mální relativní hustoty bylo dosaženo pro výkony laseru 300–400 W a rychlostech skenování 500 mm/s. V dalším kroku byla provedena tahová zkouška, při které se podařilo dosáhnout meze pevnosti materiálu 449 MPa, což je hodnota srovnatelná s klasickými uhlíkovými oceli produkovaných konvenčními metodami.

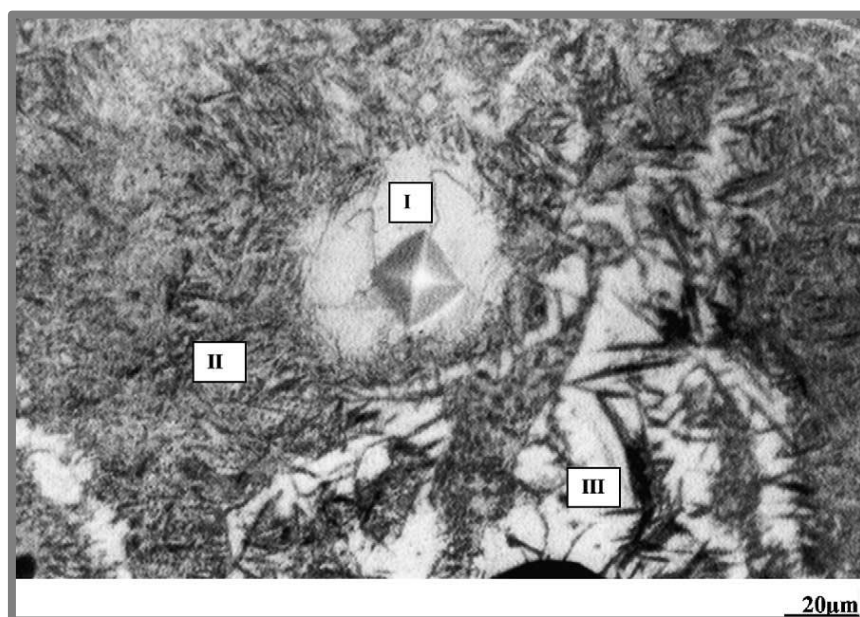
2.4.3 Simchi – zkoumání tvrdosti

Předmětem práce Simchiho [10] je výzkum mikrostruktury směsi prášků čistého železa a grafitu (0,4–1,6 %) zpracované metodou Selective laser sintering. V tabulce 2-2 jsou znázorněny procesní parametry při zpracování směsi Fe-1,2%C, u které byla následně měřena mikrotvrdost podle Vickerse pro hodnotu zátěže 25 g.

Tabulka 2-2 Procesní parametry

Majoritní velikost zrna	69,4 μm
Typ laseru, mód a průměr svazku	CO ₂ , single, neuvedeno
Výkon	215 W
Rychlosti skenování	75 mm/s
Hatch distance	300 μm
Tloušťka vrstvy	100 μm

Na obr. 2-8 jsou znázorněny jednotlivé fáze na základě mikrostruktury spolu s hodnotami jejich tvrdosti.



Area	Possible phases	Carbon content (wt.%)	Hardness (HV0.025)
I	Ferrite	0.1	137
II	Tempered martensite	1.6	463
III	High carbon austenite	1.9	476

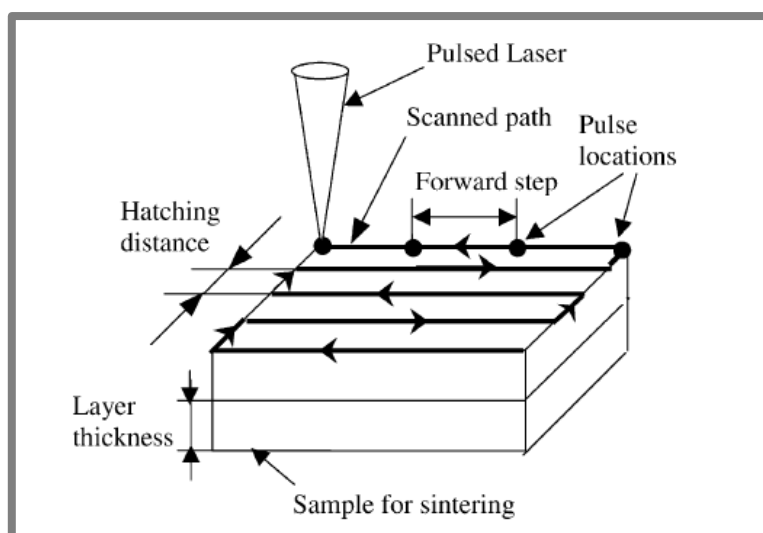
Obr. 2-8 Metalografický snímek s hodnotami tvrdosti [10]

2.4.4 Murali – Zkoumání tvrdosti

Práce Murali [11] se zabývá použitím metody SLS pro zpracování směsi prášků čistého železa (99,22 %) a grafitu (0,78%). Pro experimenty bylo použito zařízení s Nd-YAG laserem v pulsním módu o výkonu 100 W. Další procesní parametry jsou na obr. 2-9. Rychlost skenování není v článku uvedena. Použitá strategie skenování je na obr. 2-10.

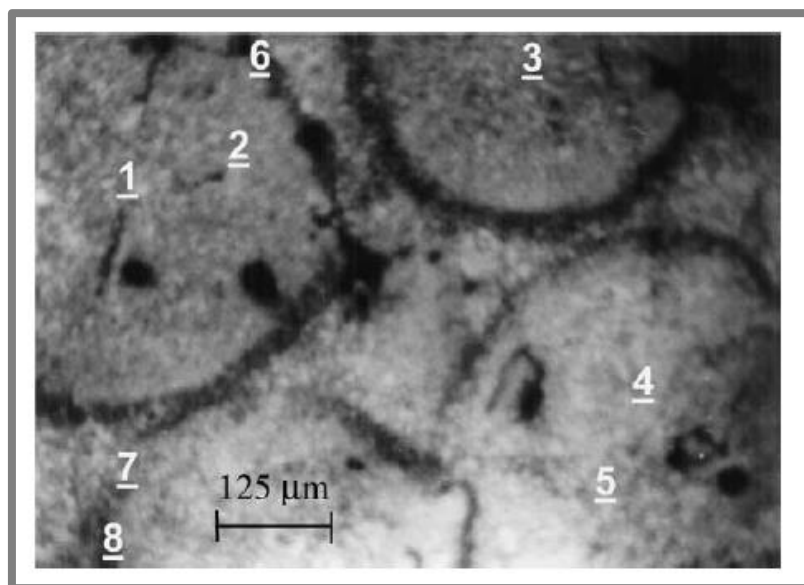
Parameters selected for experimentation	
Parameters	Selected values
Process parameters	
Hatching distance (μm)	500
Layer thickness (μm)	500
Step size (μm)	500
Inert gas flow rate (l/min)	5
Laser parameters	
Energy per pulse (J)	4
Pulse width (ms)	12
Spot size (μm)	620
Wavelength (μm)	1.06
Material parameters	
Mean size of iron powder (μm)	~ 53
Percentage of iron powder	~ 99.2
Percentage of graphite powder	~ 0.78

Obr. 2-9 Procesní parametry [11]



Obr. 2-10 Strategie skenování [11]

Na vyrobených vzorcích byla zkoumána mikrotvrdost na různých místech vyznačených na obr. 2-11. Zkouška tvrdosti podle Vickerse byla provedena pod zátěží 100 g po dobu 15 s. Příslušné hodnoty jsou znázorněny na obr. 2-12.



Obr. 2-11 Vyznačené oblasti zkoumání tvrdosti [11]

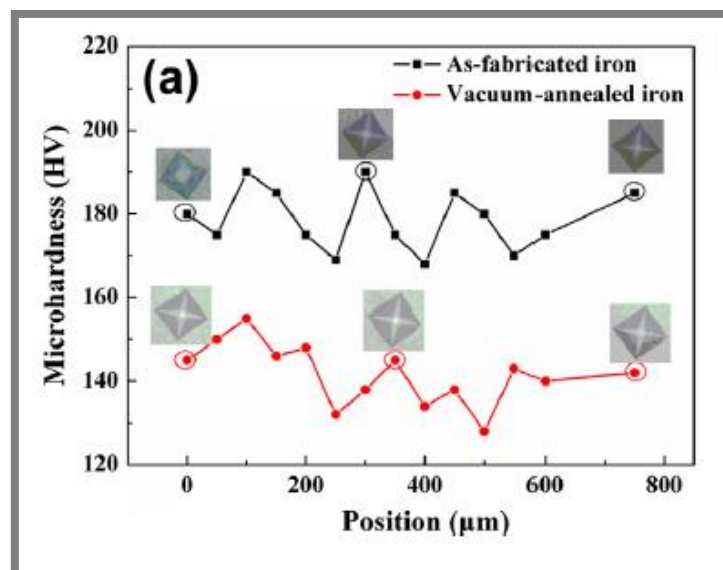
Location in micrograph	Hardness value, HVN (HRC)	Location in micrograph	Hardness value, HVN (HRC)
1	348.3 (36)	5	304.7 (31)
2	389.6 (40)	6	540.5 (51)
3	352.0 (36)	7	524.0 (50)
4	334.2 (34)	8	488.6 (48)

Obr. 2-12 Hodnoty naměřených tvrdostí [11]

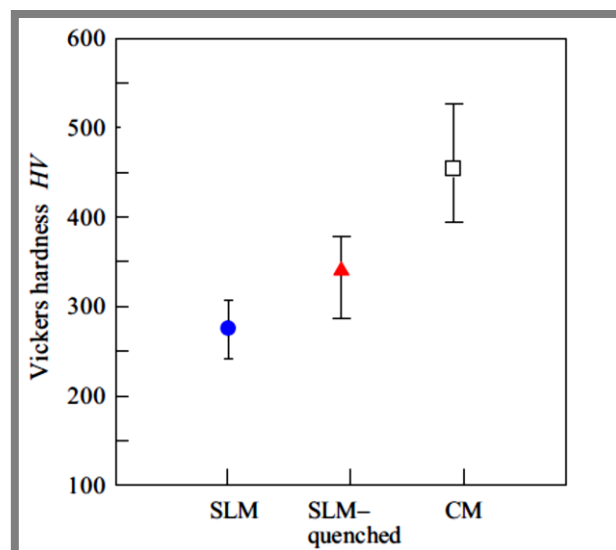
2.5 Vliv tepelného zpracování na tvrdost

Song [12] ve své další práci studuje kromě zbytkového napětí a tahového napětí také mikrotvrdost na vzorcích z čistého železa vyrobených technologií SLM před a po tepelné úpravě. Ta spočívá v ohřátí dílu na teplotu 640 °C po dobu 2,5 hodiny a následném nenuceném ochlazení v peci na pokojovou teplotu (rekrytalizační žíhání). Celý proces probíhá ve vakuu. Následně byly provedeny Vickersovy zkoušky tvrdosti pod zatížením 200 g po dobu 15 s. Na obr. 2-13 jsou vyobrazeny výsledky zkoušek. Bylo provedeno 14 měření pro každý stav. Jak je z obrázku patrné, vyšší tvrdosti dosahují vzorky bez tepelné úpravy. Důvodem je částečný zánik původní jemné struktury, která vznikla rychlým tuhnutím taveniny. Na druhou stranu bylo tímto postprocessingem výrazně sníženo zbytkové napětí ve vzorku, téměř na nulovou hodnotu.

V porovnání s konvenčně vyrobeným vzorkem je tvrdost SLM dílu téměř poloviční, viz obr. 2-14, kde jsou srovnány tvrdosti dílů z nerezové oceli [13].



Obr. 2-13 Tvrdost podle Vickerse před a po tepelné úpravě [12]



Obr. 2-14 Porovnání tvrdostí SLM vzorků a CM (konvenční metoda) vzorků [13]

2.6 Drsnost povrchu SLM dílů

Kruth [14] ve své práci zkoumá vliv různých procesních parametrů na kvalitu povrchu vrchní strany vzorků z nerezové oceli zpracované metodou SLM. Procesní parametry, při kterých bylo dosaženo nejlepších hodnot jsou vypsány v tabulce 2-3.

Tabulka 2-3 Procesní parametry

Majoritní velikost zrna	neuvedeno
Typ laseru, mód a průměr svazku	Nb-YAG, pulzní 50 kHz, 200 μm
Výkon	80 W
Rychlosti skenování	200-400 mm/s
Hatch distance	20 μm
Tloušťka vrstvy	neuvedeno

Při daných procesních parametrech byly vyrobeny vzorky a poté zpracovány metodou SLE (Selective laser eroding) a následně SLR (Selective laser remelting). Při metodě SLE dochází spíše k odebírání materiálu intenzivním vypařováním pomocí laseru v pulzujícím módu dosahujícím vysokých hodnot výkonů. Použitím daných metod došlo k výraznému snížení drsnosti povrchu horní vrstvy vzorků, viz obr. 2-15.



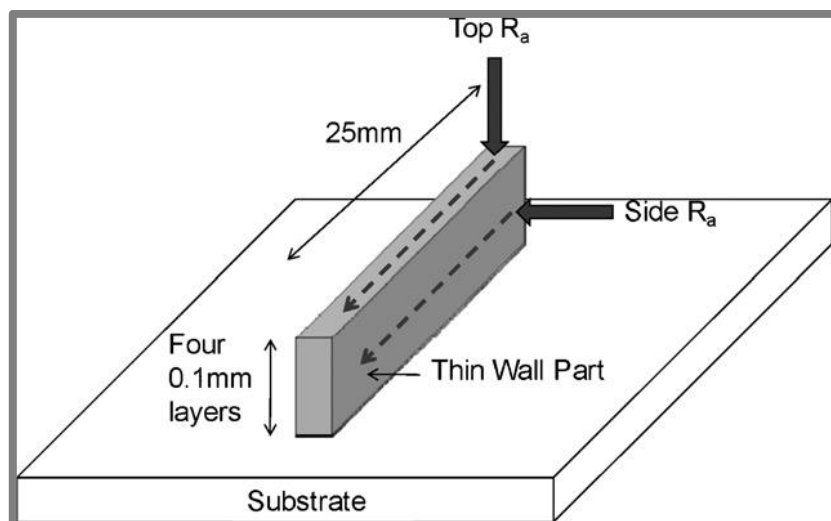
Obr. 2-15 Výsledné hodnoty průměrné drsnosti povrchu pro jednotlivé operace [14]

Práce Mumtaze [15] se zabývá drsností povrchu u tenkostěnných vzorků materiálu Inconel 625® zpracovaného metodou SLM při různých pulzních módech laseru. Procesní parametry experimentů jsou popsány v tabulce 2-4.

Tabulka 2-4 Procesní parametry

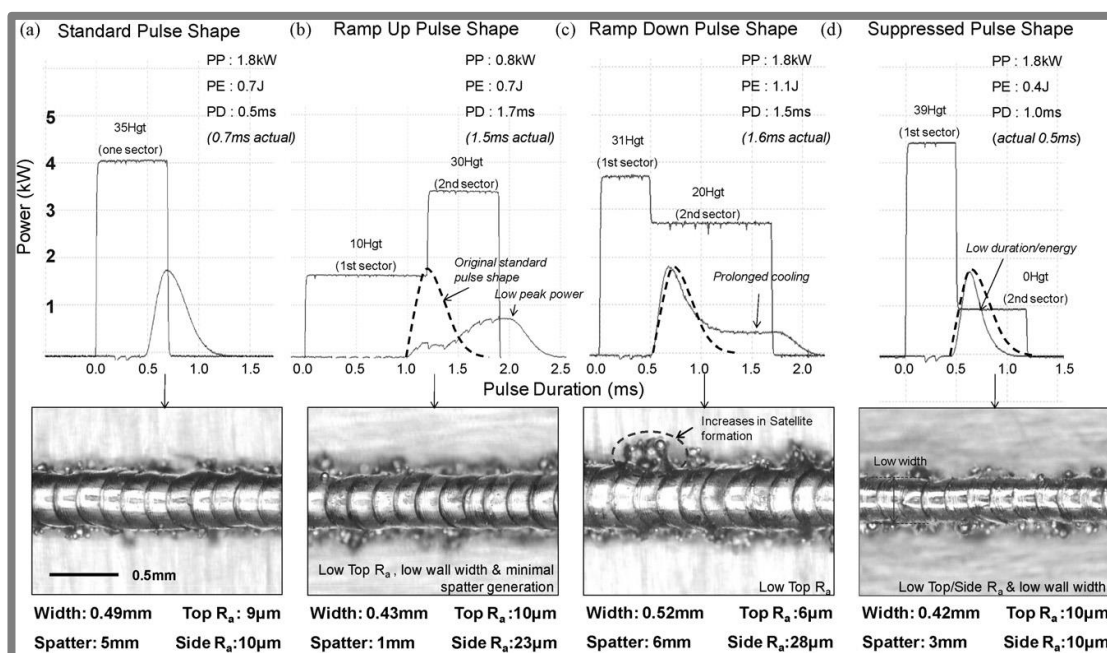
Majoritní velikost zrna	53 μm
Typ laseru, mód a průměr svazku	Nb-YAG, pulzní, 800 μm
Výkon	20-100 W
Rychlosti skenování	400 mm/s
Hatch distance	20 μm
Tloušťka vrstvy	100 μm

Při těchto procesních parametrech byly stavěny vzorky o šířce jednoho návaru a výšce čtyř nanesených vrstev, viz obr. 2-16.



Obr. 2-16 Tenkostěnný vzorek [15]

Na obr. 2-17 jsou pak tvary a charakteristické hodnoty použitých typů pulzů laseru, včetně mikroskopických snímků jednotlivých návarů. Ve spodní části obrázku jsou ke každému módu vypsány hodnoty dosažené šířky vzorku a drsnosti povrchu na horní (top) a boční (side) straně vzorku.

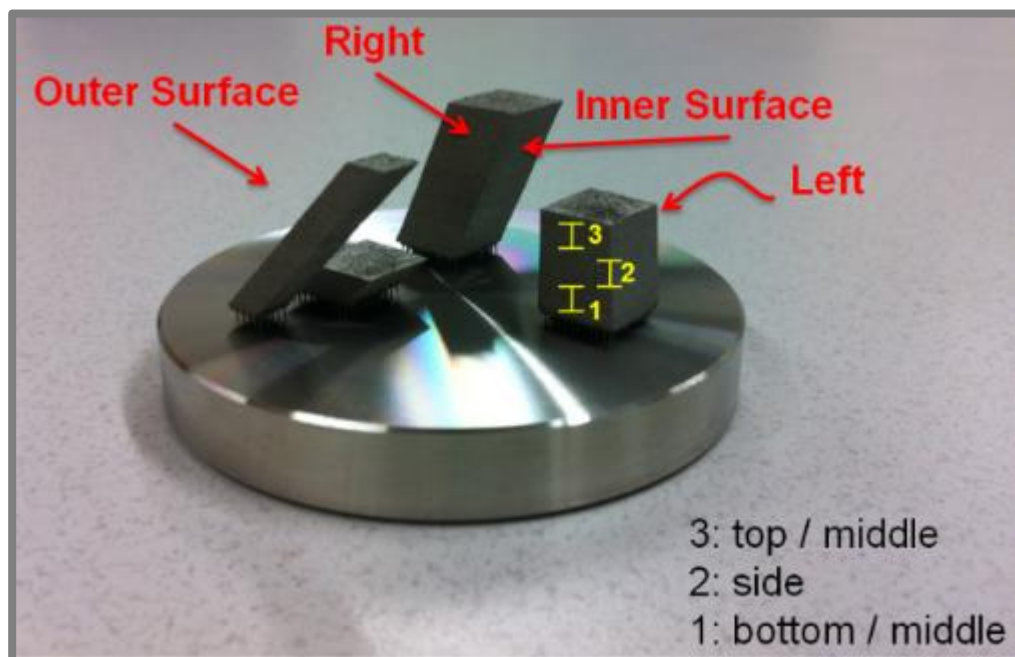


Obr. 2-17 Tvary pulsů a příslušné snímky návarů [15]

Jak je patrné, nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí Supressed Pulse módu, který se vyznačuje nejnižší šířkou a drsností povrchu bočních stěn.

Gebhart [16] ve svém článku popisuje závislost drsnosti povrchu na různých aspektech stavby u objemových vzorků vyrobených technologií SLM z nástrojové oceli. K výzkumu byl použit stroj SLM-50 Desktop od firmy Realizer. Na obr. 2-18 jsou

zachyceny vytištěné vzorky různé geometrie, na kterých byla následně měřena drsnost povrchu Ra pomocí drsnoměru M2 firmy Mahr GmbH.



Obr. 2-18 Vytištěné vzorky včetně značení jednotlivých ploch [16]

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření drsnosti v závislosti na specifikovaných aspektech.

Tab. 2-1 Závislost drsnosti povrchu Ra na úhlu mezi vzorkem a platformou
(popis ploch podle obr. 2-18)

Úhel a velikost vzorku	Outer Surface Ra [μm]	Inner Surface Ra [μm]
45° 10x10x20	7,473	9,813
65° 10x10x20	5,462	7,436
90/85° 10x10x20	5,352	5,673
45° 5x5x20	6,922	7,869
65° 5x5x20	5,833	6,796

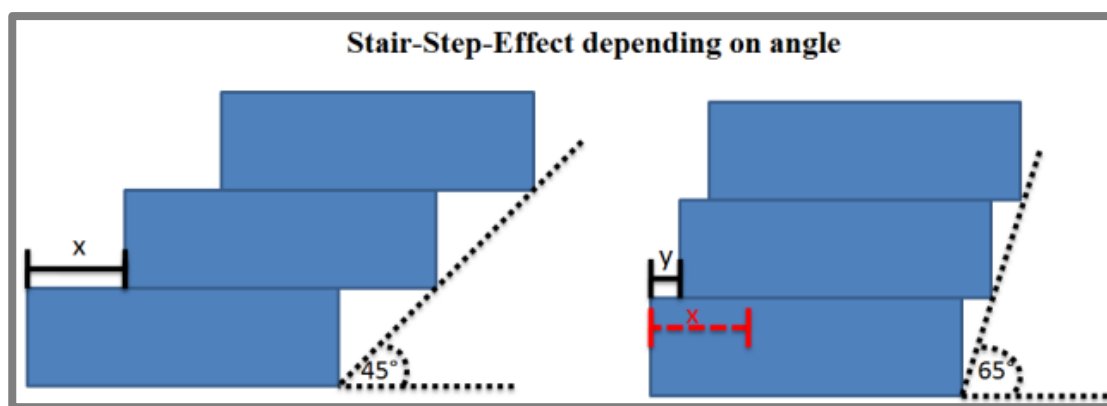
Tab. 2-2 Závislost drsnosti povrchu Ra
na velikosti vzorku

Velikost vzorku	Drsnost Ra [μm]
10x10x20	7,885
5x5x20	7,435
Rozdíl Ra v %	5,7 %

Tab. 2-3 Závislost drsnosti povrchu Ra na místě měření (popis pozic podle obr. 2-18)

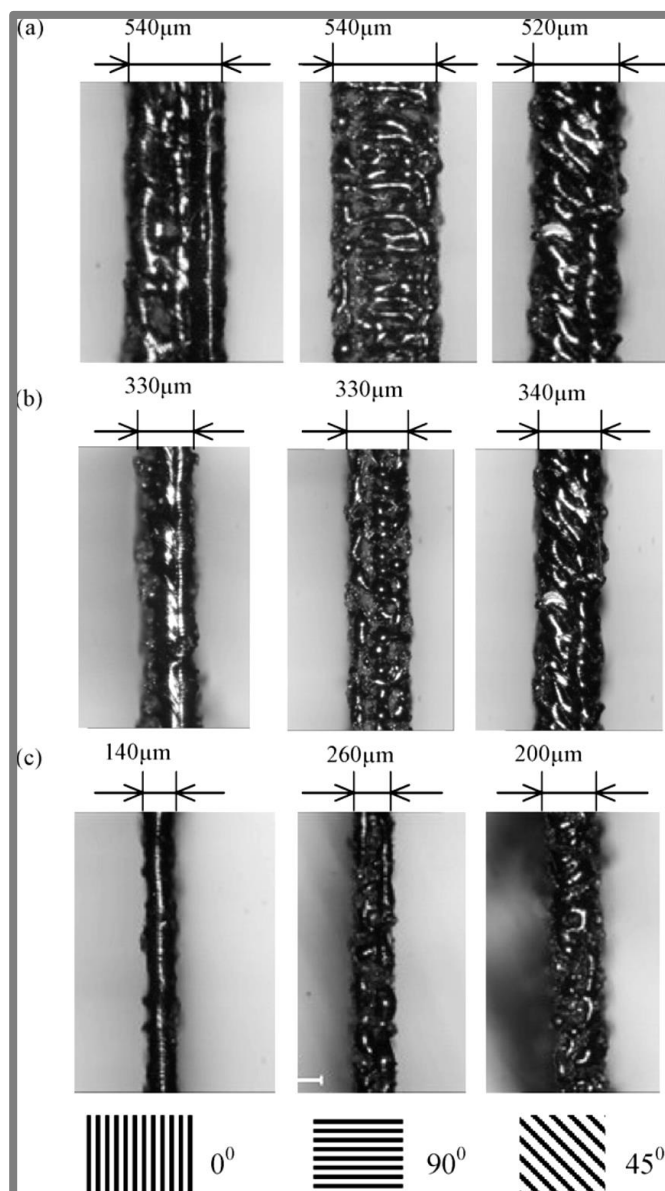
Místa měření na vzorku	Bottom middle	Side	Top middle
Drsnost povrchu Ra [μm]	6,3662	6,26	6,26

Z výsledků vyplývá, že velikost vzorku, popřípadě místo měření na totožné straně vzorku, ovlivňuje drsnost povrchu pouze nepatrně. Větší roli hraje úhel stavby, kdy vzorky svírající s platformou úhel 45° dosahují horších výsledků než vzorky tištěné pod úhlem 65° . Zároveň je drsnost zhruba o $2 \mu\text{m}$ vyšší na „inner surface“ než na „outer surface“. Tento výsledek jasně odpovídá principu celé technologie Selective laser melting, kdy díl vzniká vrstvu po vrstvě. Při pohledu na obr. 2-19 je patrné, že čím více se úhel mezi vzorkem a stavěcí deskou blíží 90° , tím menší difference v horizontálním směru mezi jednotlivými vrstvami vznikají, tedy drsnost povrchu se snižuje.

**Obr. 2-19** Způsob stavby vzorků pod úhlem [16]

2.7 Geometrická přesnost tenkostěnných dílů

Yadroitsev [17] ve své publikaci prezentuje výsledky výzkumu zaměřeného na tenkostěnné díly vyráběné technologií SLM z prášku Inox 904L, tedy nerezové oceli. CAD modely vzorků měly délku 20 mm, výšku 5 mm a proměnnou tloušťku 100, 200 a 400 μm . Dalším proměnným parametrem bylo natočení vzorku na stavěcí desce v ose z. Výkon laseru byl nastaven na hodnotu 50 W a rychlost skenování na 140 mm/s. Z obr. 2-20 je patrné, že úhel natočení vzorku na platformě v ose z u daného typu zařízení značně ovlivňuje tloušťku stěny.



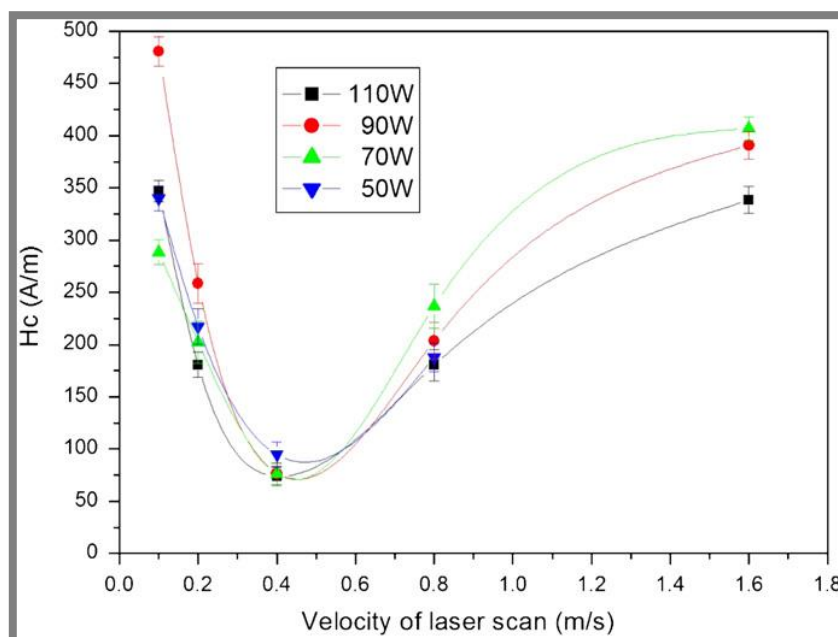
Obr. 2-20 Horní pohled tenkostěnných vzorků tištěných s různým úhlem natočení. Tloušťka modelu stěn je (a) 400 μm , (b) 200 μm , (c) 100 μm [17]

Jak je patrné, bylo dosaženo minimální tloušťky 140 μm . Tato hodnota může být lehce nekorektní vzhledem ke způsobu měření z pohledu shora, kdy dochází ke zkreslení na rozdíl od provedení snímku v řezu. Dále je viditelné, že úhel natočení vzorku na stavěcí desce má vliv na výslednou tloušťku a kvalitu vzorku. Tento jev však může být u každého zařízení odlišný (rozdílný způsob nanášení prášku, fokus laseru, oběh inertní atmosféry).

2.8 Magnetické vlastnosti SLM vzorků

Zhang [18] se ve svém článku zabývá zkoumáním magnetických vlastností dílů vytvořených aditivní technologií. Výzkum je prováděn na vzorcích tvaru krychle o velikosti hrany 5 mm ze sloučeniny Fe-Ni s 30% zastoupením niklu. Rychlosti skenování byly nastaveny od 0,1 do 1,6 m/s a výkon laseru od 50 do 100 W. Tloušťka

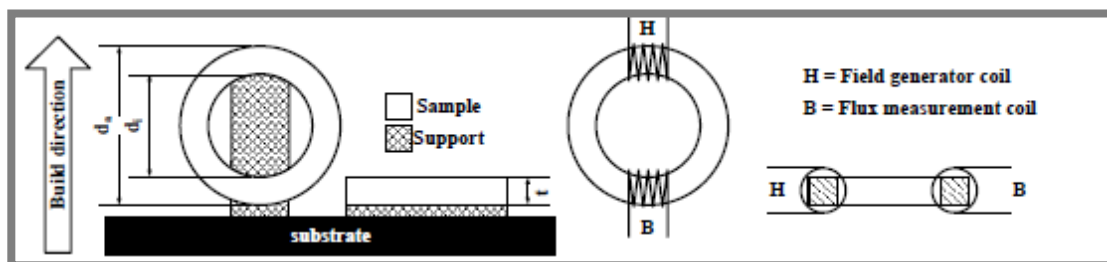
vrstvy a průměr laserového paprsku byl 50 μm . Magnetické vlastnosti byly změřeny pomocí profesionálního hysterezimetru Bull M 2000/2010. Výsledky jsou vyobrazeny formou hysterezních smyček pro výkon laseru 90 W a pro rychlosti skenování 0,1 m/s, 0,4 m/s a 1,6 m/s, viz obr. A-1 příloha A. Vzorky vykazují nízkou koercivitu a vysokou hodnotu magnetizace. Obr. 2-21 prezentuje vývoj koercivity H_c v závislosti na různých procesních parametrech. Důležitým poznatkem je nárůst koercivity při zvyšování rychlosti skenování od 0,4 do 1,6 m/s, což je způsobeno zvýšením porozity vzorků. Tento jev lze potlačit zvýšením výkonu laseru.



Obr. 2-21 Graf závislosti koercivity na rychlosti skenování pro různé hodnoty výkonu laseru [18]

Ve své další práci, která zahrnuje stejný materiál i nastavení procesních parametrů, Zhang uvádí pro srovnání nejlepší hodnoty magnetických vlastností SLM dílů s konvenčně vyrobeným materiálem [19]. Pro vzorky stavěné rychlostí 0,4 m/s při výkonu laseru 110 W vychází magnetická saturace $M_s = 550 \text{ Am}^2/\text{kg}$ a koercivita $H_c = 75 \text{ A/m}$. Oproti tomu tradičně zpracovaný materiál Fe-30%Ni dosahuje hodnot $M_s = 400 \text{ Am}^2/\text{kg}$ a $H_c = 480 \text{ A/m}$.

Práce Bauera [20] porovnává hodnoty mag. vlastností slitiny Fe-Ni vytvořené 3D tiskem jednak klasickým skenováním a tzv. „re-meltingem“, při kterém je každá vrstva opětovně trasována laserem. Tuto metodu popisuje Kruth [21] ve svém článku. Jejím účelem je vyhlazení jednotlivých vrstev a tím omezení růstu zrn ve směru stavby, což má za následek snížení vnitřní porozity. Bauer ve svém článku popisuje metodu měření magnetických vlastností na vzorku ve tvaru kruhu s vnitřním průměrem 22 a vnějším 30 mm. Na tomto kruhu jsou vytvořeny dvě cívky z drátu o 10 otáčkách, kdy jedna slouží k vybuzení magnetického pole a druhá k odečítání magnetizačního, resp. elektrického, proudu, viz obr. 2-22.



Obr. 2-22 Vlevo vertikální a horizontální způsob stavby, vpravo způsob měření mag. vlastností [20]

Výsledky měření jsou na obr. 2-23. Horizontální způsob vykazuje vyšší hodnoty koercivity pro oba způsoby skenování a zároveň vyšší hodnotu magnetické saturace pro standardní sken. Metoda opětovného skenu vykazuje horší vlastnosti v porovnání s klasickou metodou, z čehož plyne závěr, že opětovné skenování nemá podstatný vliv na magnetické vlastnosti vzorku. Toto tvrzení ovšem platí pouze pro dané procesní parametry a materiál.

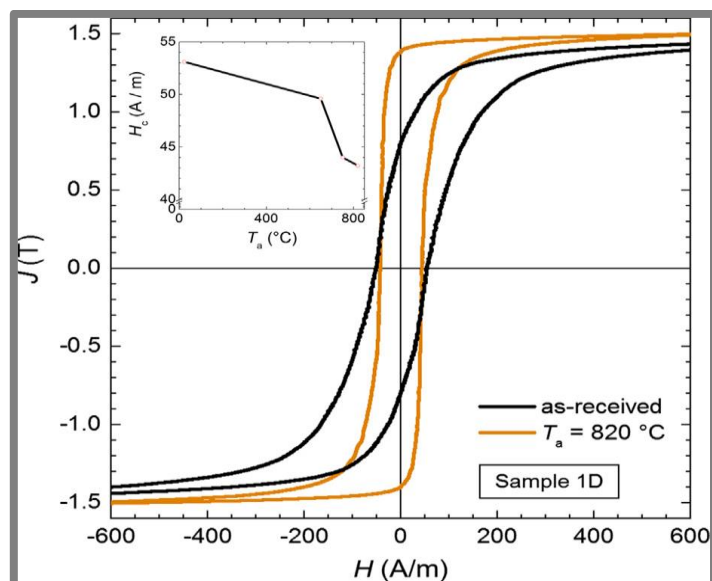
	Horizontal		Vertical	
	Coercive force	Saturation	Coercive force	Saturation
	Hc [A/m]	Ms [T]	Hc [A/m]	Ms [T]
Standard Scan	29.4	0.330	25.1	0.290
Re-scan	33.8	0.270	32.0	0.270
Abs. Difference	4.4	0.060	6.9	0.020
Rel. Difference	13.0%	22.2%	27.5%	6.9%

Obr. 2-23 Porovnání dosažených hodnot mag. vlastností [20]

2.9 Vliv tepelného zpracování na magnetické vlastnosti

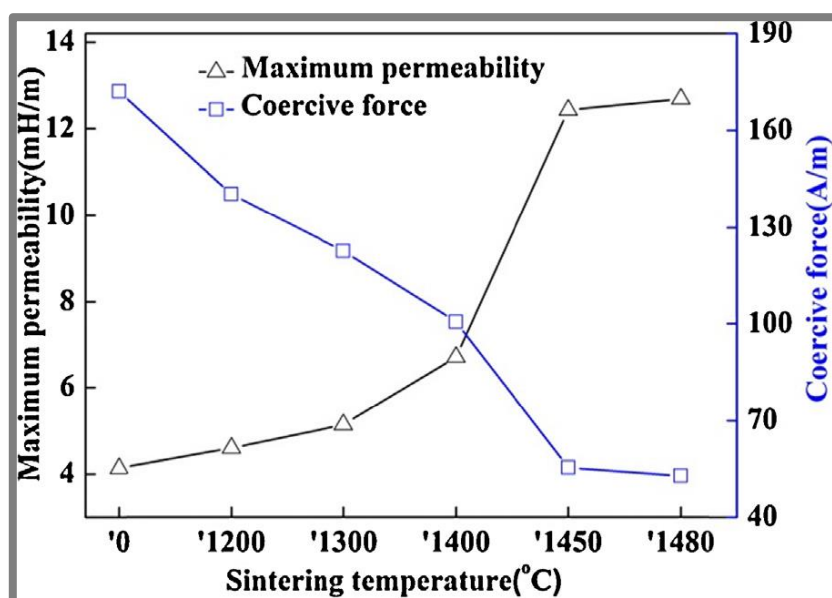
Studie Vyaznikova [22] zkoumá vliv žhání čistého železa zpracovaného konvenční metodou na magnetické vlastnosti. Při experimentu byl vzorek zahřátý na teplotu 950 °C po dobu od 3 do 8 hodin. Pro dosažení magneticky měkkého materiálu se jako nejlepší projevila doba žhání 7–8 hodin, při které byla zaznamenána nejmenší hodnota koercivity. Dále bylo zjištěno, že čím rychlejší ochlazování následuje, tím se magnetické vlastnosti zhorší. Optimálním postupem je nechat vzorky pozvolně chladnout v peci na teplotu 400 °C a poté na vzduchu na pokojovou teplotu.

Novodobější práci zabývající se obdobným tématem je práce Ferrara [23], která také zkoumá vliv žhání vzorků z čistého železa na jejich magnetické vlastnosti. Byly zkoumány tři teploty žhání, a to 650, 750 a 820 °C. Z obr. 2-24 je patrné, že s rostoucí teplotou žhání hodnota koercivity klesá. Při žhání na teplotu 820 °C dojde k poklesu koercivity až o 20 %.



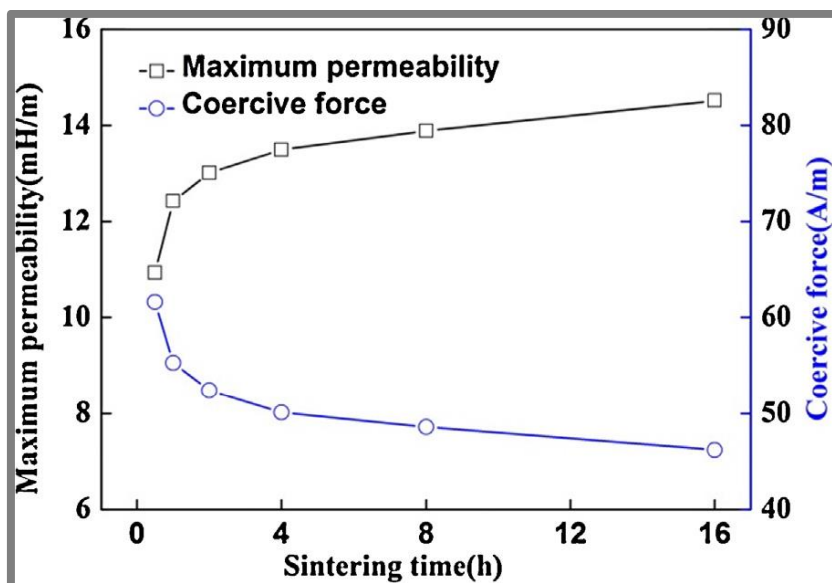
Obr. 2-24 Hysterezní smyčka při teplotě žhání 820 °C [23]

Jidong Ma [24] se zabývá magnetickými vlastnostmi čistého železa zpracovaného sintrováním¹. Nejdříve byly z prášku vylisovány vzorky pomocí hydraulického lisu YA32-63 pod tlakem 1000 MPa. Následně byly vzorky spékány v rozmezí teplot 1200-1480 °C. Předmětem výzkumu byl vliv teploty a doby sintrování na magnetické vlastnosti čistého železa. Výsledky jsou promítnuty na obrázcích 2-25 a 2-26.



Obr. 2-25 Závislost maximální permeability a koercivity na teplotě sintrování [24]

¹ spékáním



Obr. 2-26 Závislost maximální permeability a koercivity na době sintrování [24]

Jak je z obrázků patrné, s rostoucí teplotou a dobou tepelného zpracování se magnetické vlastnosti zlepšují. Jako optimální se jeví ohřev na teplotu 1450 °C po dobu 4 hodin. Po překročení těchto hodnot se magnetické vlastnosti zlepšují již nepatrně.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Hlavním řešeným problémem práce je nalezení optimálních procesních parametrů tisku pro čisté železo, které budou zajišťovat vysokou kvalitu tenkostěnných vzorků, dobré mechanické a magnetické vlastnosti. Je velice obtížné dosáhnout dobrých vlastností dílu ve všech směrech, některé se vzájemně vylučují, jako například zbytkové napětí a tvrdost materiálu, kdy vzorek s vysokým vnitřním pnutím (negativní) dosahuje vyšší tvrdosti (pozitivní). Proto je důležité stanovit si určitý kompromis mezi jednotlivými vlastnostmi a některé zvolit jako prioritní na úkor ostatních. Vzhledem k předpokladu, že výsledný díl bude tvořen kombinací objemových a tenkostěnných prvků, je nezbytné provést výzkum procesních parametrů obou typů geometrií. Dále je důležité optimalizovat procesní parametry tak, aby bylo dosaženo co nejmenší drsnosti povrchu především na bočních stěnách (kolmých či stavěných pod úhlem vzhledem k platformě) tenkostěnných vzorků. Zmíněná drsnost povrchu bývá obecně u SLM dílů, bez použití přídavných operací, vysoká.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Jako stěžejní jsou považovány práce Palouška a Songa, které se zabývají výzkumem vlivu procesních parametrů tisku z čistého železa na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Paloušek dosáhl porozity 0,015 % při hustotě energie 118,5 J/mm³. Při tomto nastavení docházelo k mírnému přepalování vrstev na okrajích vzorků. Je tedy nutné doladit procesní parametry pro tisk objemových vzorků tak, aby k tomuto jevu nedocházelo. Přesná hodnota pórovitosti Songových vzorků není v článku uvedena, avšak dosahuje téměř 0 % při hustotě energie 151,5 J/mm³. Tím se stávají jeho procesní parametry méně efektivní oproti Palouškovým (vyšší energie, nižší rychlost stavby). Zároveň bylo pro Palouškův výzkum použito stejné zařízení SLM, na kterém bude vypracována i tato diplomová práce. Je tedy možné použít stejné datové soubory a na výzkum přímo navázat.

Tisku tenkostěnných dílů z čistého železa, popř. z nerezové či nástrojové oceli, která jsou čistému železu z dostupných materiálů nejbližší, se prozatím věnuje jenom několik publikací. Je tedy nutné provést širokospektrální výzkum pro získání komplexních poznatků stavby tenkých stěn. V první řadě bude nutné zjistit, jakou nejmenší stěnu je možné z daného materiálu vyrobít a v jaké kvalitě. Jak popisuje Yadroitsev, výsledná šířka tenké stěny nemusí vždy odpovídat tloušťce v navrženém CAD modelu. Důležitou roli bude hrát drsnost povrchu, aby bylo možné popsat, jakou nejužší mezeru mezi dvěma tenkými stěnami je možné vytisknout, aniž by se dané stěny vzájemně dotýkaly. Z práce Krutha vyplývá, že remelting má významný vliv na výslednou drsnost povrchu horní vrstvy dílu, která však není tolik podstatná jako drsnost povrchu vertikálních stěn tištěných dílů. Tu lze výrazně ovlivnit volbou pulzu laseru, což ovšem není u SLM zařízení, které je k dispozici pro tento výzkum, možné. Z další práce vyplývá závislost drsnosti povrchu na úhlu mezi stěnou vzorku a platformou, avšak pouze na objemových vzorcích. Proto bude nutné provést experiment objasňující velikost drsnosti povrchu u tenkostěnných dílů tištěných pod úhlem.

Dalším poznatkem je vliv tepelného zpracování na magnetické vlastnosti materiálu, kdy s rostoucí teplotou a dobou žhání materiálu klesá hodnota koercivity a roste maximální permeabilita. Zároveň dochází k výraznému poklesu zbytkového

napětí a tím i redukci naměřené tvrdosti materiálu. Dále bylo zjištěno, že při použití re-meltingu, tedy opětovného skenování vrstvy, dochází ke snížení zbytkového napětí na úkor tvrdosti.

Co se týče vyhodnocování porozity vzorků, bude v první řadě použita metoda zkoumání metalografických výbrusů pomocí optického mikroskopu. Pouze u některých vzorků, kde budou předpokládány dobré výsledky, či nebude metoda výbrusů relevantní, bude použita analýza pomocí μ CT.

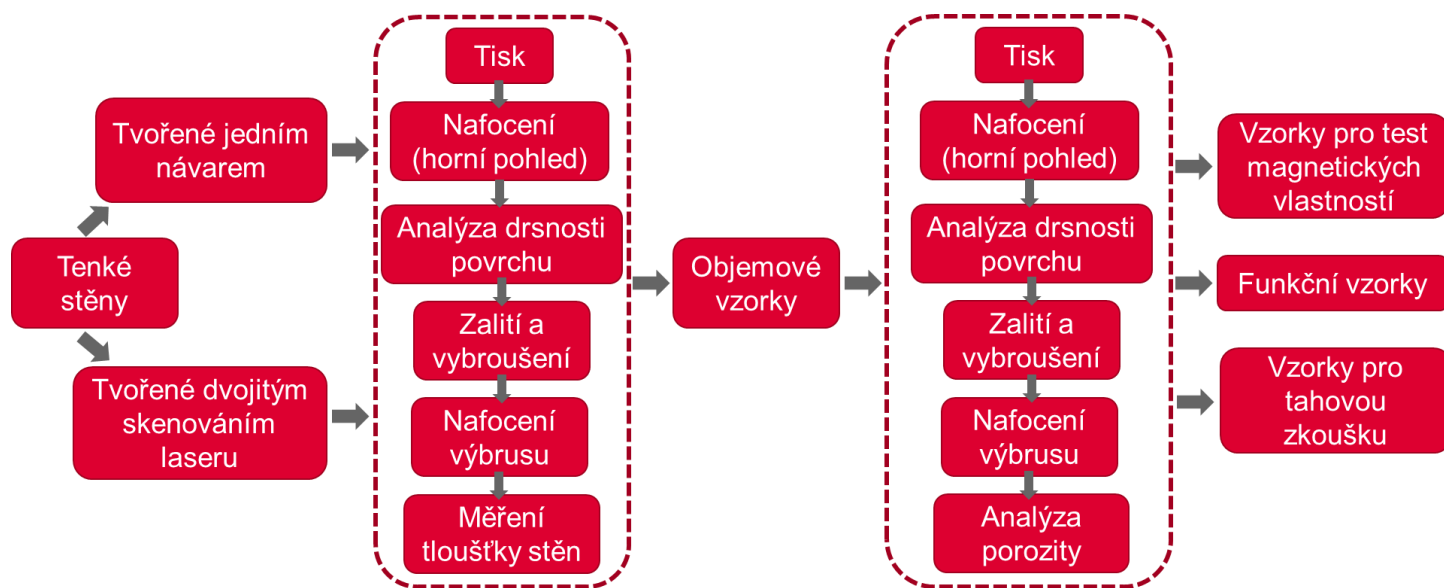
3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Cílem práce je objasnit vliv procesních parametrů na rozměrovou přesnost a mechanické vlastnosti tenkostěnných struktur z čistého železa se zaměřením na elektromagnetické aplikace. Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat hlavní procesní parametry
- navrhnout experimenty pro objasnění vlivu procesních parametrů na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu
- zjištění mechanických vlastností železa zpracovaného laserem
- realizace dílu pro konkrétní aplikaci.

Požadovanými výstupy jsou: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol.

4 MATERIÁL A METODY



Obr. 4-1 Schéma pracovního postupu

Schéma na obr. 4-1 vyobrazuje postup řešení diplomové práce. V první fázi byl proveden test objemových vzorků pro ověření procesních parametrů uvedených v publikaci Palouška. Vzhledem k neúspěchu tohoto testu byly do plánu zařazeny další testy objemových vzorků s upravenými procesními parametry na základě testů tenkostěnných dílů probíhajících paralelně. Výzkum procesních parametrů pro tisk tenkostěnných dílů probíhal ve třech fázích popsaných v následující tabulce.

Tab. 4-1 Fáze vývoje procesních parametrů tenkých stěn včetně počtu vyrobených vzorků

Číslo fáze	Popis	Počet vzorků
1	Kolmé stěny tvořené jedním návarem	118
2	Kolmé stěny tvořené dvojím skenováním laseru včetně statistického testu	952
3	Stěny stavěné pod úhlem 45 °	53

Při objemových testech bylo vyrobeno a zpracováno dohromady 65 vzorků. Po provedení analýzy výsledků zmíněných testů proběhla výroba tahových vzorků a jejich zkouška, stavba vzorků pro test magnetických vlastností a v závěrečné fázi stavba dílu pro konkrétní aplikaci.

4.1 Metalurgický prášek

Prášek tvořený z 99,5 % hmotnosti železem byl dodán kanadskou firmou Rio Tinto. Přesné označení materiálu je Atomet FeAM. Prášek byl vyroben pomocí vodní atomizace. Z obdržení 40 kg tohoto prášku byl odebrán vzorek a podroben analýze distribuce částic pomocí zařízení Horiba LA 950, který funguje na principech laserové difrakce. Výsledky byly následně porovnány s hodnotami garantovanými výrobcem.

4.2 Použité zařízení pro výrobu vzorků

Veškeré vzorky byly vyrobeny pomocí zařízení SLM 280^{HL} od firmy SLM Solutions GmbH. Parametry zařízení jsou uvedeny v tabulce 4-2. Pro přípravu dat k tisku byl použit software Materialise Magics s doplňkem Materialise Build Processor 3.0 sloužícím k úpravě procesních parametrů a generování SLM souboru.

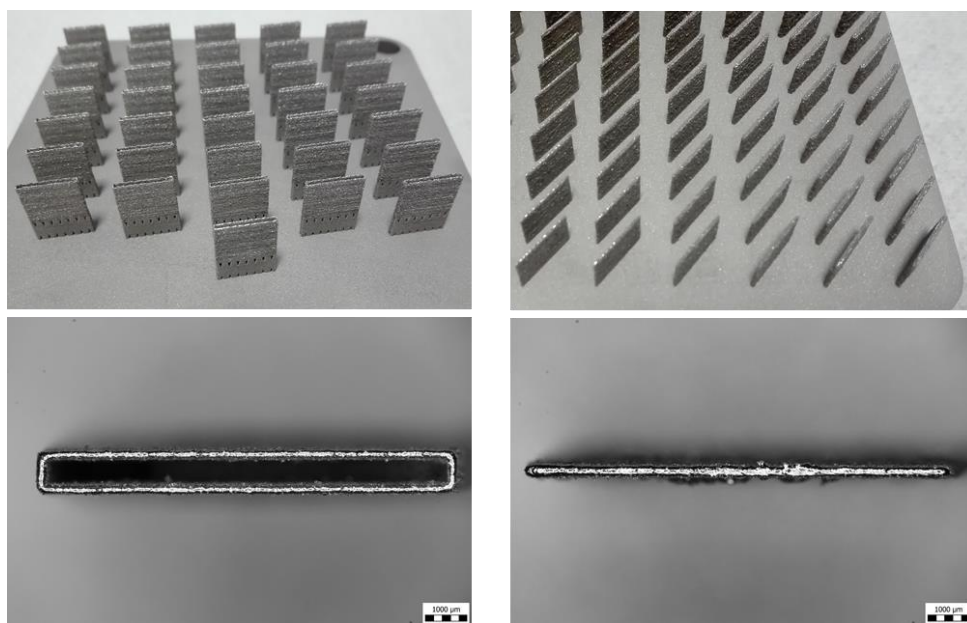
Tab. 4-2 Parametry zařízení SLM 280^{HL}

Tloušťka vrstvy	20-100 μm
Výkon laseru, druh, průměr ohniska	400 W, YLR-Faser-Laser, 82 μm
Druh inertní atmosféry	Dusík
Min. tloušťka stěny	180 μm
Podpůrné struktury	ANO
Stavební prostor	280 x 280 x 350 mm ³

Zařízení umožňuje redukci stavebního prostoru pomocí redukčního rámečku a malé stavěcí desky, podle velikosti a množství stavěných dílů. Rozměry malé platformy jsou 100 x 100 mm.

4.3 Tenkostěnné vzorky

Existují dva typy tenkostěnných vzorků (**dále TS vzorky**). Vzorky tvořené jedním návarem, nebo dvojím skenováním laseru



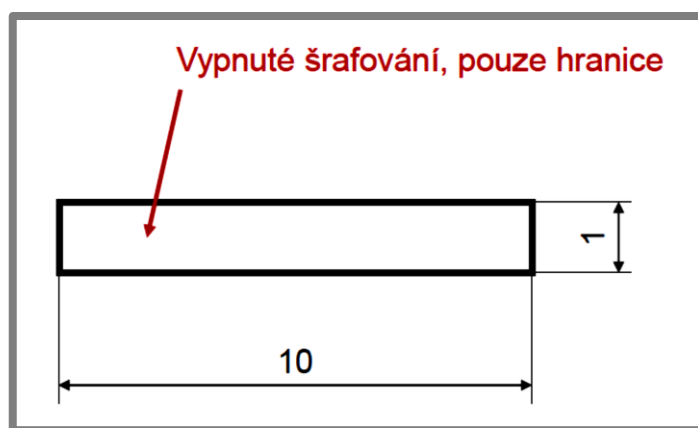
Obr. 4-2 Vzorky tvořené jedním návarem (vlevo), vzorky tvořené dvojím skenováním laseru (vpravo)

V programu pro přípravu dat k tisku Magics není možné vytvořit vzorek na obr. 4-2 vpravo za použití strategie jednoho přejezdu laseru. Tento typ vzorku je v každém řezu tvořen dvojnásobným skenováním laseru po stejné trase, tzv. remeltingem. Pokud chceme zjistit vlastnosti tenké stěny tvořené jedním návarem, je nutné postavit

vzorky obdobné geometrie jako na obr. 4-2 vlevo, kde trasa laseru v každé vrstvě představuje uzavřenou smyčku. Je ovšem nutné vyvinout procesní parametry pro tisk obou typů vzorků, jelikož novější verze softwaru již umožňují vypnutí jednoho ze dvou přejezdů laseru po stejné trase.

4.4 Test TS vzorků tvořených jedním návarem

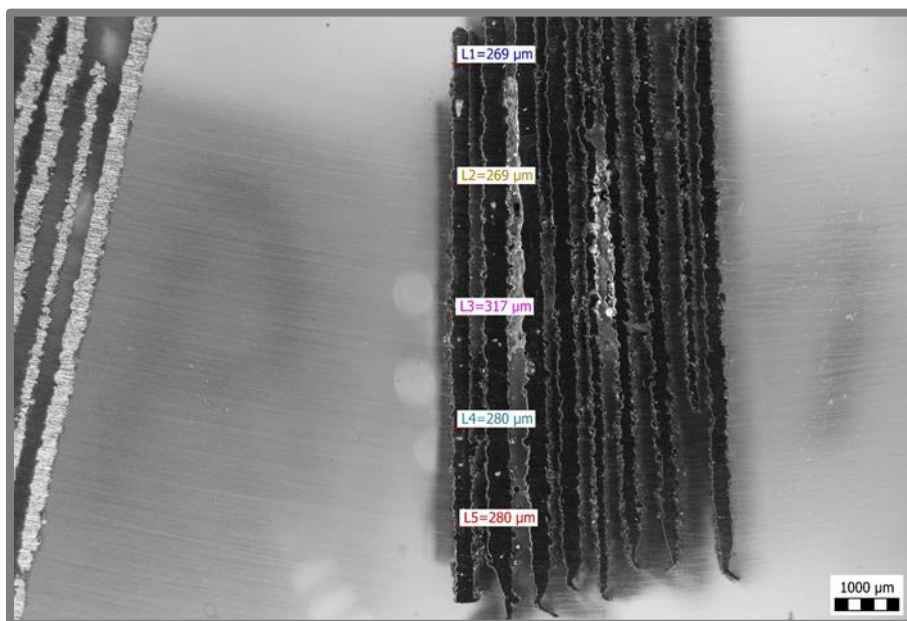
Vzorky měly podobu kvádrů o rozměrech 1 x 10 a výšce 8 mm. Strategie tisku byla nastavena tak, aby laser vytvářel pouze hraniční návary vzorků (obr. 4-3).



Obr. 4-3 Geometrie tenkostěnného vzorku tvořeného jedním návarem

4.4.1 Test TS vzorků č. 1

První stavba probíhala na velké platformě společně s tiskem vzorků pro objemový test č. 1. Tenkostěnných vzorků bylo na stavěcí desku rovnoměrně rozmístěno 35. Každý z nich měl totožné procesní parametry, a to výkon laseru 350 W a rychlost skenování 800 mm/s. Po odříznutí vzorků z platformy a odstranění podpor byly vzorky seřazeny podle pořadí definovaného při vytváření materiálového souboru, slepeny dohromady, zality a vybroušeny. Cílem tohoto testu bylo sledování rozdílů v kvalitě tisku na jednotlivých místech velké platformy. Kvalita vzorků byla určena ze snímků výbrusů pořízených optickým mikroskopem OLYMPUS SZX7, kdy hodnotícím kritériem byla tloušťka jednotlivých stěn. Ta byla měřena v pěti místech každé stěny a zprůměrována pomocí softwaru QuickPHOTO MICRO 3.1, viz obr. 4-4. Daný postup zpracování byl použit u všech následujících testů tenkostěnných vzorků, pokud není řečeno jinak.



Obr. 4-4 Metoda měření tloušťky stěn

4.4.2 Test TS vzorků č. 2

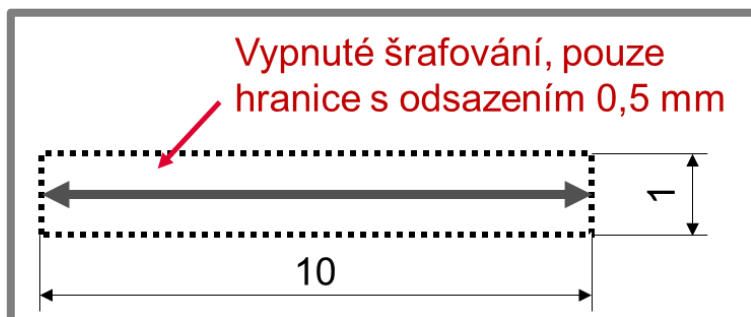
Podmínky druhé stavby a následného zpracování byly takřka totožné jako v předchozí podkapitole. Jediným rozdílem byla velikost stavěcí desky, v tomto případě byla použita malá platforma. Cílem testu bylo opět sledování rozdílů v kvalitě tisku na jednotlivých místech tentokrát malé platformy. Dále byly výsledky testu 1 a 2 mezi sebou porovnány a stanoveny základní podmínky pro další experimenty.

4.4.3 Test TS vzorků č. 3

Třetí test zahrnoval 48 vzorků s proměnným výkonem laseru (100–400 W) a rychlostí skenování (150–1200 mm/s). Vzorky byly po odstranění podpor zkoumány na optickém profilometru Bruker ContourGT-X8, konkrétně byla zjišťována drsnost povrchu na bočních stěnách. Poté byly vzorky zpracovány obvyklým způsobem.

4.5 Test TS tvořených dvojím skenováním laseru

Při těchto experimentech byly tištěny vzorky obdobné geometrie jako v předchozí kapitole s tím rozdílem, že bylo na hraniční návary aplikováno odsazení 0,5 mm směrem do středu vzorku. Výsledkem byla tenká stěna tvořená dvojitým přejezdem laseru v každé vrstvě po stejné trajektorii.



Obr. 4-5 Geometrie tenkostěnného vzorku tvořeného dvěma návary

Výsledkem experimentu je vliv procesních parametrů na tloušťku stěn tvořených dvojím skenováním laseru

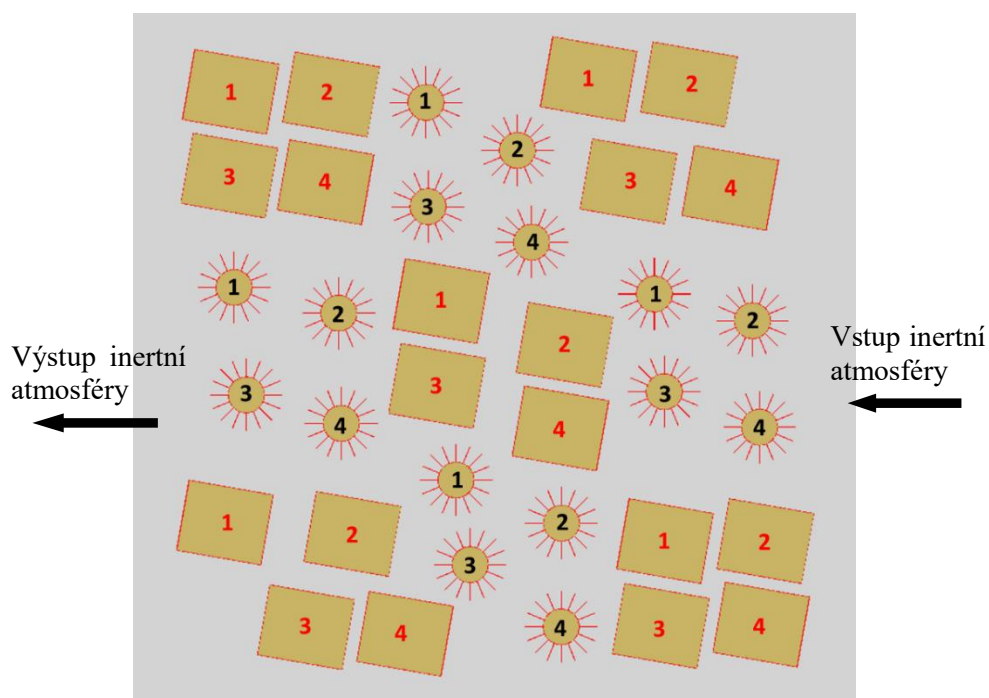
4.6 Statistický test

V rámci dalšího experimentu TS vzorků tvořených dvojím skenováním laseru byl proveden statistický test spojený s testem tisku nejmenší mezery mezi dvěma lamelami. Zároveň byl v tomto testu zjišťován vliv natočení tenké stěny na stavěcí desce v horizontální rovině. Byla vyhotovena sada vzorků ve tvaru hřebenů a válců obklopených 16 tenkými stěnami, viz obr. 4-6.



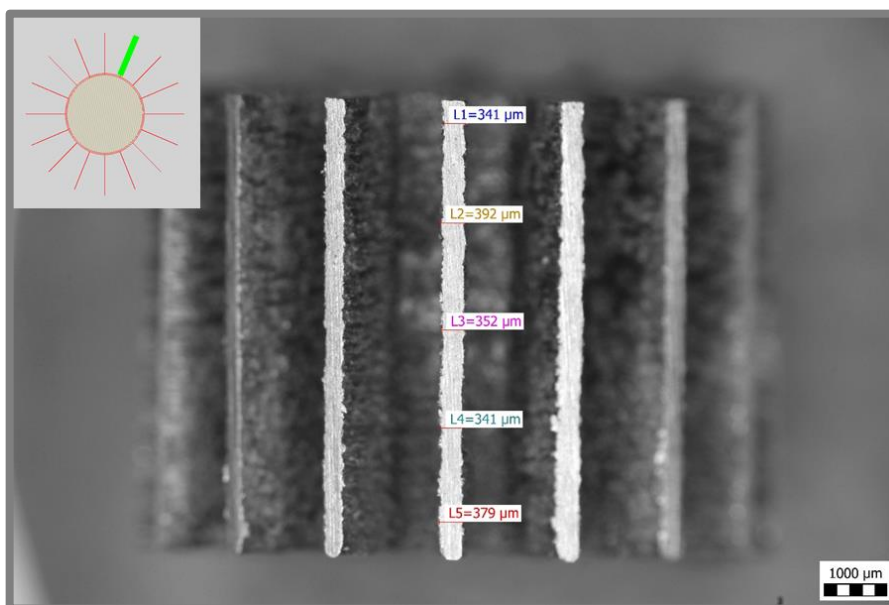
Obr. 4-6 Hřebenovité a válcovité vzorky pro statistický test

Hřebenový vzorek se skládal z 32 tenkých stěn, rozdělených do skupin po čtyřech, kde v každé skupině byla navržena stejná mezera mezi lamelami. Tyto mezery se v rámci každého vzorku zvětšovaly. Tenké stěny byly ve spodní části spojeny objemem, který zajišťoval jejich soudržnost po odříznutí ze stavěcí desky. Vzorky byly rozděleny do skupin po čtyřech, viz obr. 4-7 znázorňující rozestavění vzorků na platformě s číslem a popisem použitých procesních parametrů.



Obr. 4-7 Rozmístění vzorků na platformě s označením procesních parametrů. Výkon laseru konstantní: 100 W, rychlost skenování: 1) 100 mm/s, 2) 200 mm/s, 3) 300 mm/s, 4) 400 mm/s

Dohromady bylo vytištěno 850 tenkých stěn. U válcovitých vzorků byla každá lamela individuálně vybroušena z boční strany (obr. 4-8).

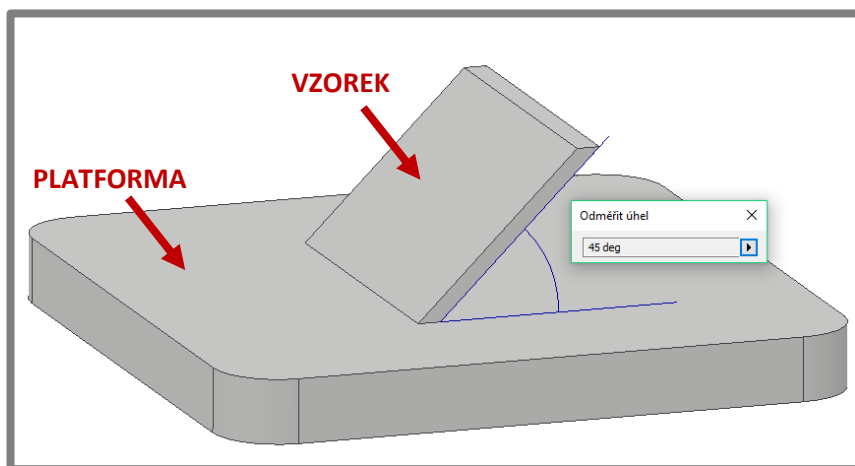


Obr. 4-8 Snímek výbrusu lamely válcovitého vzorku

Hřebeny byly zality a poté vybroušeny taktéž z boční strany v rovině kolmé ke směru stavby tak, aby bylo možné změřit tloušťku stěn a šířku mezer mezi nimi.

4.7 Test šikmých TS vzorků

Pro optimalizaci tisku TS vzorků stavěných pod úhlem byly vyrobeny dvě sady vzorků. První sada obsahovala 9 vzorků. Cílem testu bylo zjištění vlivu úhlu stavěného TS vzorku na drsnost povrchu a tloušťku stěn. Úhel mezi stěnou a platformou byl nastaven na hodnotu 45° , viz obr. 4-9, tedy na limitní stav, kdy ještě není nutné použití podpor a kde je očekáváno největší zhoršení kvality povrchu, viz kapitola 2.6.



Obr. 4-9 Orientace vzorku na platformě (ilustrativní)

Na základě výsledků experimentu byl v druhé fázi proveden test aplikace rozdílných parametrů pro spodní povrch vzorků, tzv. downskin. Cílem testu bylo zvýšení kvality povrchu spodní strany a sledování vlivu použití rozdílných procesních parametrů na výslednou tloušťku TS vzorků.

4.8 Objemové vzorky

Jak bylo popsáno v kapitole 3, bylo možné navázat na výzkum Palouška a pro tisk objemových vzorků v prvním testu využít procesních parametrů vycházejících z jeho experimentů jako optimálních. U všech testů byla použita tzv. stripe strategie šrafování s délkou šrafovacího pole 10 mm a natočením v každé vrstvě o 33° . Vzhledem k výsledkům prvního testu, které zpochybnilly vhodnost daných procesních parametrů pro tisk objemových vzorků na velké platformě, a také na základě analýzy návarů z testu TS vzorků č. 3 bylo nutné zařadit do plánu další testy objemových vzorků, popsané níže.

4.8.1 Test objemových vzorků č. 1

V prvním a ve všech následujících testech byly vyrobeny vzorky ve tvaru kvádrů o rozměrech 25 x 10 x 8 mm. Bylo použito větších rozměrů s cílem predikovat výskyt pórů u vícerozměrných dílů. Tloušťka nanášené vrstvy prášku byla konstantních 50 μm , stejně tak „hatch distance“ tedy vzdálenost šraf o hodnotě 90 μm . Změna probíhala pouze u výkonu laseru a rychlosti skenování. Výkon nabýval hodnot od 300 do 400 W po 25 W. Rychlost laseru se měnila od 500 do 800 mm/s po 50 mm/s. Celkem bylo vytištěno 35 vzorků. Vzhledem k množství a velikosti vzorků tisk musel probíhat na velké platformě a také za použití podpor o výšce 5 mm pro snadné oddělení kvádrů od platformy po tisku.

Po oddělení vzorků a odstranění podpor proběhla příprava metalografických výbrusů na metalografické brusce s následným focením a vyhodnocováním pomocí optického mikroskopu OLYMPUS SZX7.

4.8.2 Test objemových vzorků č. 2

Procesní parametry pro další experiment objemových vzorků byly stanoveny na základě vzhledu jednotlivých návarů z testu TS vzorků č. 3. Byly vybrány procesní parametry, které produkovaly tenké a kontinuální návary s malým množstvím nabalených (sintrovaných) částic kolem svaru, které mají vliv na výslednou drsnost povrchu na stěnách kolmých k platformě. Vzdálenost šraf byla nastavována na polovinu tloušťky TS vzorku pro danou kombinaci procesních parametrů. Tloušťka vrstvy byla opět 50 μm . Zhotovení snímků výbrusů proběhlo stejným způsobem jako v předešlém experimentu. Na snímcích byla dále vyhodnocena porozita pomocí programu ImageJ.

4.8.3 Test objemových vzorků č. 3

V tomto experimentu bylo postaveno 15 vzorků se snahou zjistit procesní parametry vedoucí ke snížení celkové doby tisku při zachování stejných, či nižších hodnot porozity získaných u perspektivních vzorků z předešlého experimentu. Opět byly použity procesní parametry tvořící kontinuální a tenký návar, výkon laseru byl tedy nastaven na výkon 100 a 200 W. Rychlost skenování nabývala hodnot 400-700 mm/s po 100 mm/s. Poslední proměnnou byla také vzdálenost šraf, která se měnila po desítkách μm kolem hodnoty dané polovinou tloušťky stěny vzorku tvořeného jedním návarem pro dané procesní parametry. U každé kombinace procesních parametrů byl spočítán čas stavby krychle o objemu 1 cm^3 (bez započítání doby nanášení prášku) a porovnán s nejperspektivnějšími procesními parametry z předešlého testu.

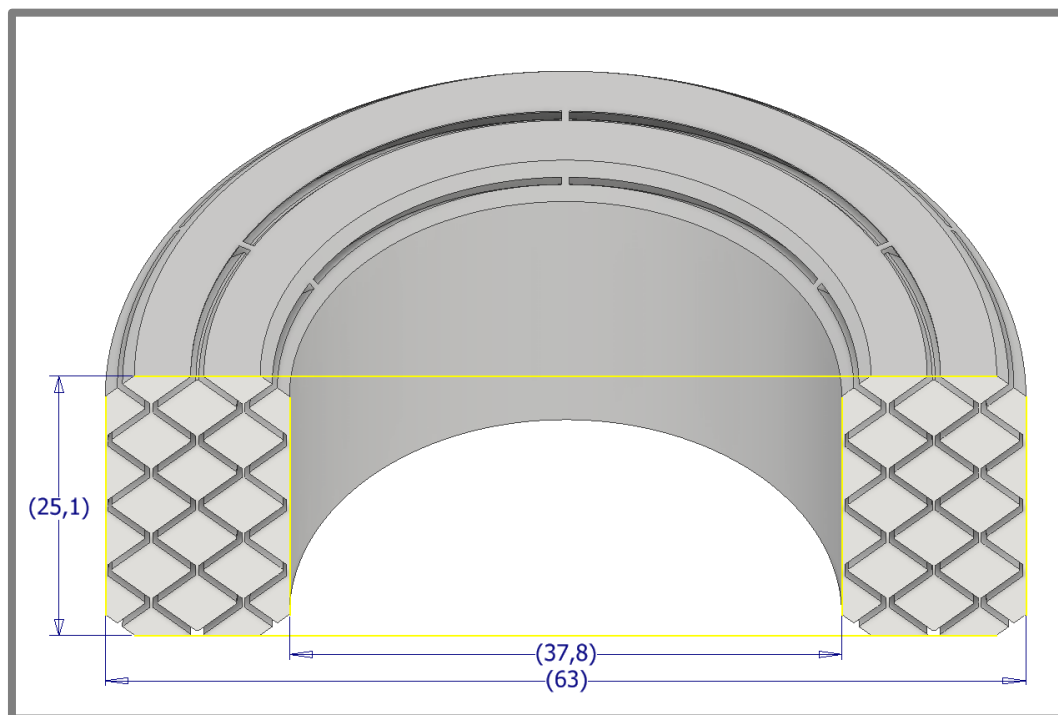
4.8.4 Test objemových vzorků č. 4

Vzhledem k výsledkům testu objemových vzorků č. 3 byl proveden další test s cílem zkrátit dobu tisku. Zde již byl nastaven výkon laseru na konstantní hodnotu 300 W a rychlost skenování na 300-500 mm/s po 50 mm/s. Vzdálenost šraf byla nastavena opět na polovinu tloušťky tenké stěny tvořené jedním návarem z testu č. 3 pro danou kombinaci procesních parametrů.

4.9 Testy magnetických vlastností

Jak je uvedené v cíli této diplomové práce, celý výzkum je zaměřen na elektromagnetické aplikace. Proto byla navázána spolupráce s diplomantem Petrem Vítkem [25] a vyrobeny sady vzorků pro testování magnetických vlastností, kterým se diplomant ve své práci zabýval. Mým dílčím úkolem byla výroba vzorků, jejichž geometrie byla Vítkem navržena na základě simulací, a postupný vývoj a úprava procesních parametrů umožňujících tisk výsledného dílu, kterým se stalo jádro magnetoreologického tlumiče.

Jelikož samotný výzkum procesních parametrů pro tisk tenkých stěn a objemových dílů probíhal paralelně s výrobou vzorků pro test magnetických vlastností, byly v prvních fázích použity procesní parametry publikované Palouškem. Konkrétně se jednalo o výrobu dvou toroidů, kdy jeden byl z plného materiálu a druhý strukturovaný. Cílem následných testů bylo ověření hypotézy zlepšení magnetických vlastností použitím strukturované geometrie.



Obr. 4-10 Řez modelu strukturovaného toroidu

Dále byly vyrobeny čtyři prstence tvořené dvěma páry různých procesních parametrů. Pro první pár byly použity Palouškovy procesní parametry, pro druhý již nově vyvinuté. Jeden z každého páru prstenců byl podroben normalizačnímu žíhání. Díly byly vystaveny teplotě 950 °C po dobu 4 hodin. Následovalo pozvolné chladnutí v peci. Celý proces probíhal na vzduchu, tedy bez ochranné atmosféry, proto bylo nutné použití kalící fólie pro potlačení oxidace a následné delaminace materiálu na povrchu dílu. Cílem následujících testů pak bylo porovnání magnetických vlastností vzorků v počátečním a vyžíhaném stavu pro potvrzení hypotézy kladného vlivu tepelného zpracování na mag. vlastnosti.

V poslední fázi probíhal tisk jader a plášťů magnetoreologických tlumičů. Nejprve byla vytisknuta zhruba jedna čtvrtina celého modelu pro vyzkoušení tří typů geometrií jader a jednoho typu pláště navržených Vítkem. Obrázky modelů jsou k nahlédnutí v příloze B. Poté byla vybrána nejvhodnější geometrie a následovala výroba celého jádra a pláště po dvou kusech od každého. Jeden pár jádra a pláště byl potom tepelně zpracován, zalit do zalévací hmoty, osoustružen a testován na testeru magnetoreologických tlumičů. Jádro z druhého páru bylo podrobeno μ CT analýze a zdigitalizováno. Získaný model byl porovnán s CAD daty v programu GOM Inspect a ve kterém byly zjištěny rozměrové odchylky. CT data byla také vyhodnocena pomocí programu myVGL 3.1.

4.10 Zalévání vzorků

Při zalévání vzorků byly použity, respektive testovány, dva druhy zalévacích hmot, které byly po konzultaci s výrobcí doporučeny pro zalévání geometricky složitých prvků, kde je požadována vysoká zabíhavost hmoty. První z nich byl přípravek EpoThin™ 2 skládající se ze dvou tekutých složek. Příprava probíhala následovně:

- Smíchání složek v předepsaném poměru po dobu 2 minut
- Zalití vzorku usazeného v silikonové formě
- Umístění formy do vakuovačky a snížení tlaku
- Při prudkém zvýšení hladiny pěny utvářející se na povrchu vakuování přerušeno
- Vytvrzení hmoty na vzduchu minimálně po dobu 9 hodin

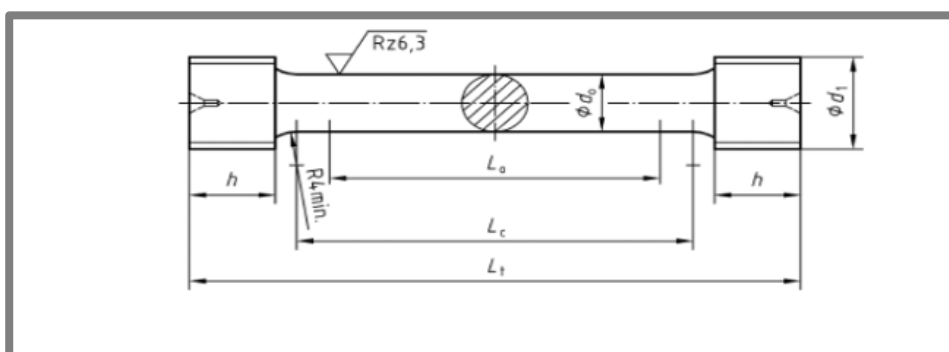
Po vybroušení vzorku bylo zjištěno nedostatečné zalití mezi jednotlivými tenkými stěnami. Proto byla testována další zalévací hmota Technovit 4002, složená z prášku a kapaliny. Postup zalévání byl následující:

- Smíchání složek v poměru 55,5 % hm. prášku ku 44,5 % hm. tekutiny
- Doba míchání 2 x 1 minuta s minutovou prodlevou
- Zalití vzorku umístěného ve formě
- Vytvrzení hmoty na vzduchu minimálně po dobu 20 minut.

Tato hmota vykazovala u tenkostěnných vzorků horší vlastnosti než první (špatná zabíhavost), proto byla použita pro zalévání objemových vzorků, u kterých se osvědčila. Pro tenké stěny byl použit zmíněný EpoThin™ 2.

4.11 Mechanické vlastnosti

Prstence zmíněné v předchozí kapitole byly po provedení měření magnetických vlastností vybroušeny v řezu a naleptány pro zjištění změny struktury materiálu po žíhání. Dále bylo na řezu provedeno měření tvrdosti podle Vickerse. Také byly vyrobeny dvě sady vzorků po čtyřech ve tvaru kvádrů o rozměrech 75x13x13 mm pro výrobu tahových vzorků. Jedna sada byla před obrobením tepelně zpracována stejným způsobem jako prstence v kapitole 4.6. Poté byly tři vzorky z každé skupiny obrobena podle normy DIN 50125 [26], viz obr. 4-11, a poté následovala tahová zkouška na zařízení Zwick Z250.

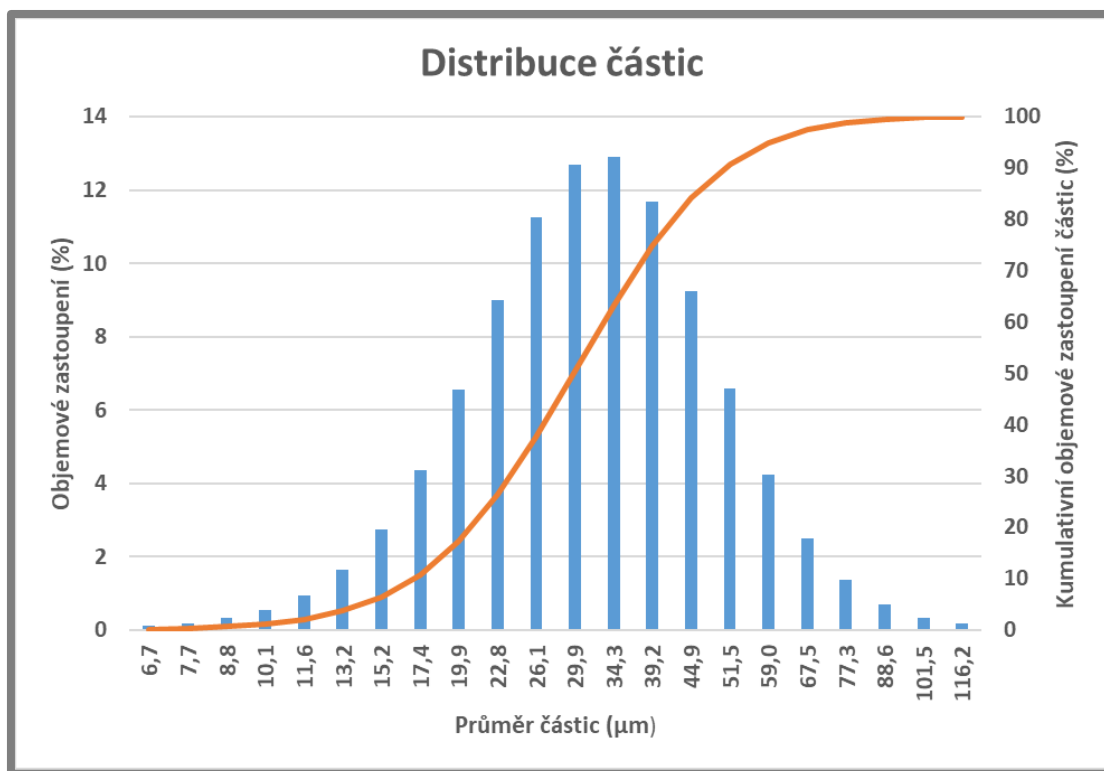


Obr. 4-11 Výkres tahového tělíska podle normy [26]

5 VÝSLEDKY

5.1 Distribuce částic použitého prášku

Na obr. C-1 v příloze jsou zaznamenány výsledky z laserové difrakce zařízení Hori-ba. Ty jsou dále přeneseny do grafu na následujícím obrázku.



Obr. 5-1 Graf distribuce částic kovového prášku

Z grafu je patrné, že v největším zastoupení jsou v prášku částice o velikosti 34 μm. Prášek je podle analýzy z 90 % tvořen částicemi, které jsou menší či rovny 50 μm, což je o 5 μm více oproti hodnotě udávané výrobcem, viz obr. C-2. Všechny hodnoty kumulativního zastoupení velikosti částic jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5-1 Kumulativní zastoupení částic

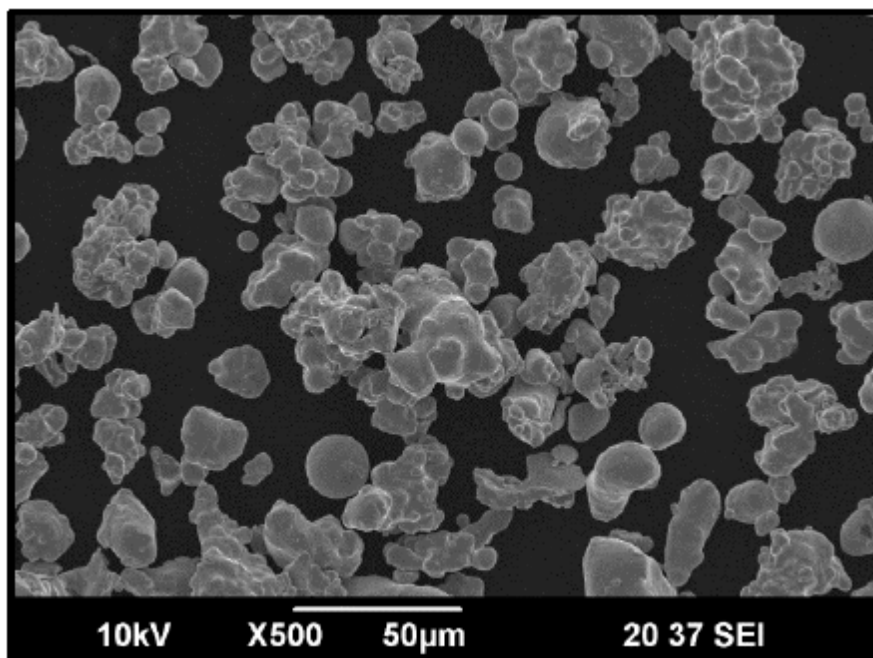
Typ kumulativního zastoupení velikosti částic	Hodnota kumulativního zastoupení velikosti částic - výrobce	Hodnota kumulativního zastoupení velikosti částic - Horiba
D10%	15 μm	17 μm
D50%	28 μm	30 μm
D90%	44 μm	50 μm
D99%	60 μm	82 μm

Na základě těchto hodnot byla zvolena tloušťka vrstvy všech připravených vzorků 50 μm. Chemické složení je uvedeno v tabulce 5-2.

Tab. 5-2 Chemické složení prášku

Chemický prvek	Hmotnostní zastoupení v %
Uhlík	0,004
Kyslík	0,08
Síra	0,007
Hořčík	0,04
Dusík	0,004
Železo	>99,5

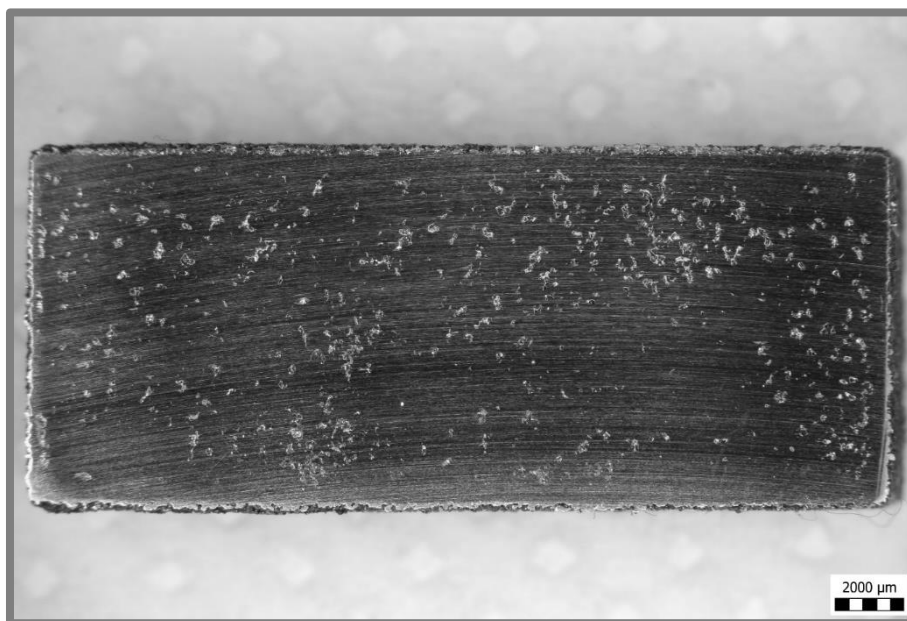
Na snímku pořízeným elektronovým mikroskopem je patrný nepravidelný vzhled částic, který je dán právě způsobem výroby. Důsledkem toho je zhoršená sypkost materiálu, částice do sebe zapadají a drží více při sobě. Prášek se tak shlukuje na stěnách nanášecího zařízení, což má v konečném důsledku neblahý vliv na spotřebu prášku při každé stavbě.



Obr. 5-2 Snímek částic prášku pořízený el. mikroskopem

5.2 Test objemových vzorků č. 1

Výsledky prvního testu objemových vzorků nedopadly dle očekávání. Jelikož byly použity stejné procesní parametry, jako v práci Palouška, byla předpokládána vysoká relativní hustota u vyrobených kvádrů. Po vyhotovení výbrusů a jejich nasnímání pomocí optického mikroskopu byla u vzorků zjištěna značná porozita.



Obr. 5-3 Snímek porézního vzorku

Vzhledem k rozporu mezi výsledkem a hypotézou bylo provedeno několik dalších výbrusů. Nejvíce vypovídajícím byl výbrus rozříznutého vzorku kolmo ke spodní stěně. Na obr. 5-4 je patrné, že póry jsou formovány do jednotlivých vodorovných vrstev po celém objemu vzorku.



Obr. 5-4 Řez objemovým vzorkem

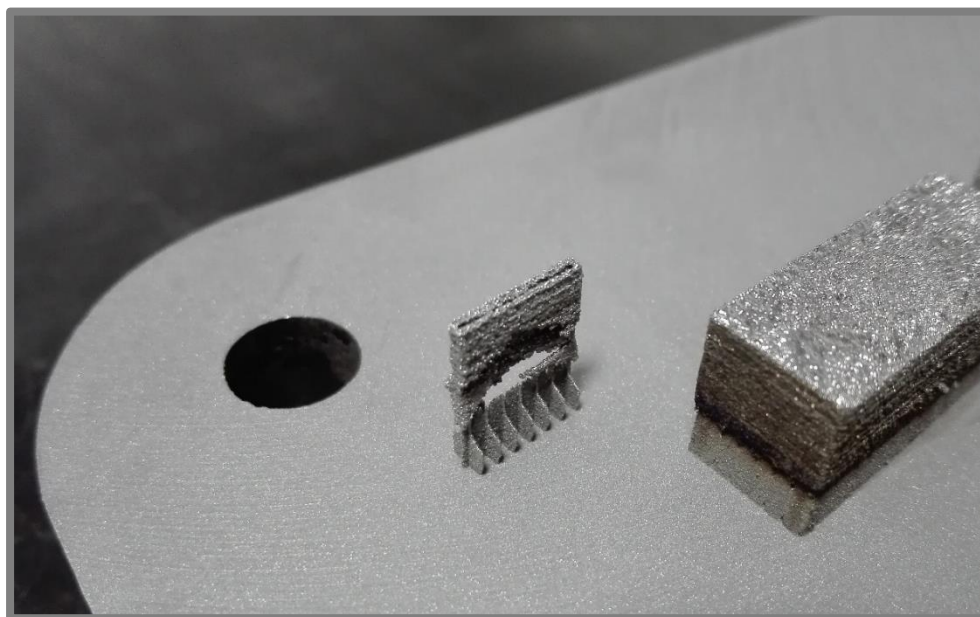
Příčin rozdílů mezi řešením a popisovaným experimentem může být více. Hlavními z nich jsou různé podmínky při stavbě vzorků. Jak bylo zmíněno, oproti článku probíhala stavba na velké platformě za použití podpor. Při stavbě na velké platformě hraje velkou roli ochlazování vzorků a odnos zplodin při pálení laserem, což je realizováno pomocí nuceného oběhu inertní atmosféry, kterou tvoří dusík. Bylo zjištěno, že proudění inertní atmosféry není rovnoměrné po celé ploše stavěcí desky. V případě, že nejsou zplodiny při svařování správně odváděny mimo dráhu laseru, může dojít ke snížení jeho výkonu vlivem difrakce laseru díky částicím tvořících dým. Další možnou příčinou je stavba vzorků na podporách. Tím dochází ke zhoršení odvodu tepla ze vzorku. Nicméně stavba větších dílů, popřípadě většího množství součástí probíhá standardně na velké stavěcí desce za použití podpor. Tyto podmínky by tedy neměly výrazně zhoršit kvalitu tištěných dílů. V poslední řadě může hrát značný význam rozdíl v distribuci částic použitých prášků. Dle obr. 5-5 se distribuce částic v porovnání s předešlým výzkumem liší. Zatímco hodnoty doložené výrobcem jsou téměř totožné s práškem použitým v této práci, hodnoty získané na zařízení Horiba jsou o 11 μm menší pro 90% kumulativní zastoupení. Do plánu experimentů byly tedy zařazeny další testy objemových vzorků založené na výsledcích TS vzorků.

	Producer	Horiba
Median		26.3 μm
Mean Size		27.3 μm
Std. Dev.		8.8 μm
Diameter of Cumulative (%)	D10% - 15 μm D50% - 28 μm D90% - 44 μm D99% - 60 μm	D10% - 16.9 μm D90% - 38.9 μm

Obr. 5-5 Distribuce částic dle Palouška [9]

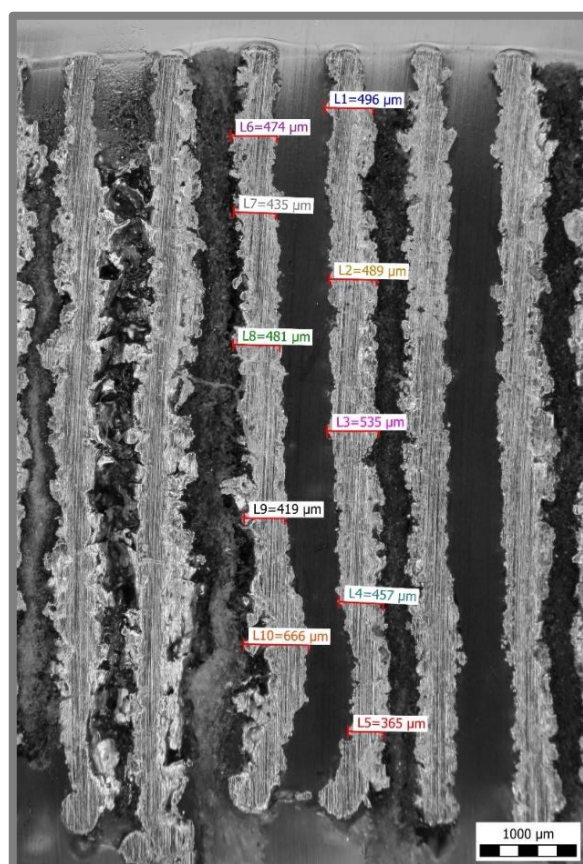
5.3 Test TS vzorků č. 1

Cílem tohoto testu bylo zjištění rozdílů v kvalitě tisku na jednotlivých místech velké platformy. Všechny 35 vzorků bylo tištěno při výkonu laseru 350 W a rychlosti skenování 800 mm/s. Tloušťka vrstvy byla konstantních 50 μm . Již po vyjmutí platformy po dokončení stavby ze stroje byla vizuálně patrná špatná kvalita jednotlivých vzorků tenkých stěn, viz obr. 5-6.



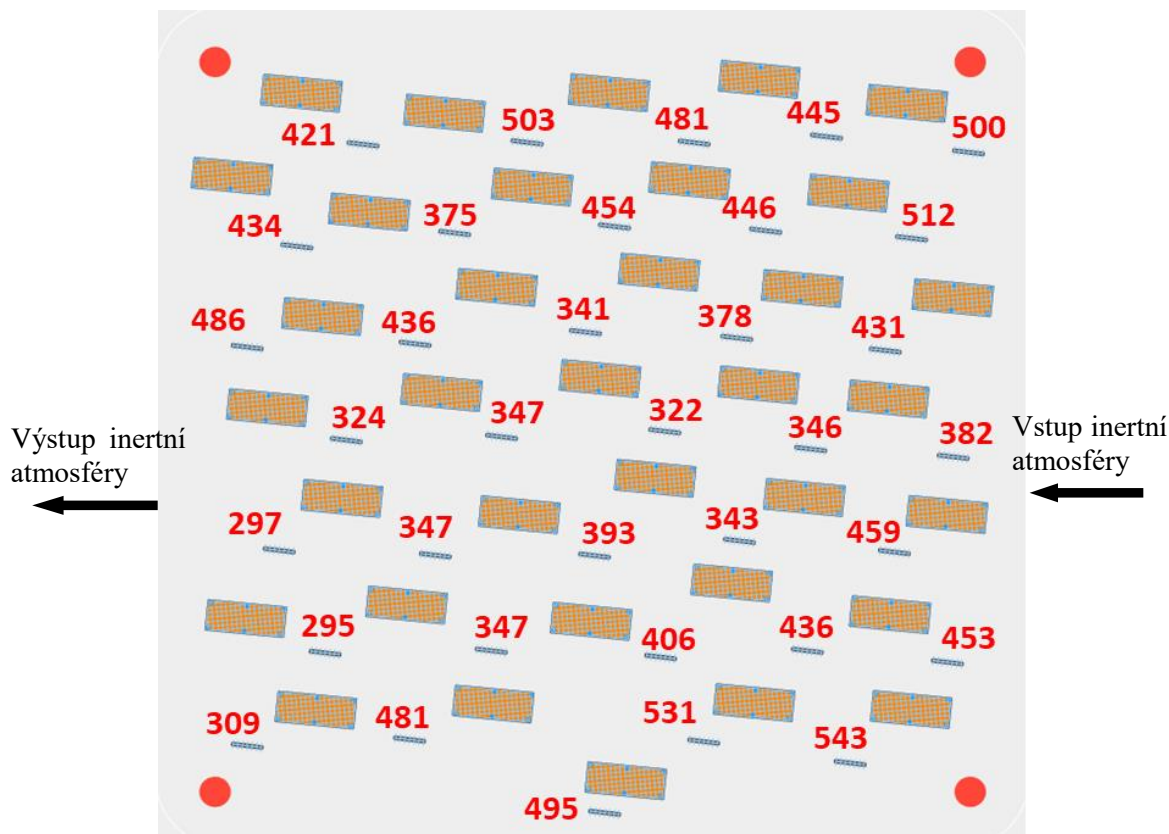
Obr. 5-6 Deformovaný tenkostěnný vzorek

Po odstranění podpor byly vzorky slepeny k sobě a zality do zalévací hmoty. Na následně vyhotovených metalografických výbrusech byla měřena tloušťka jednotlivých tenkých stěn, viz. obr. 5-7.



Obr. 5-7 Metalografický výbrus tenkostěnného vzorku s kótami

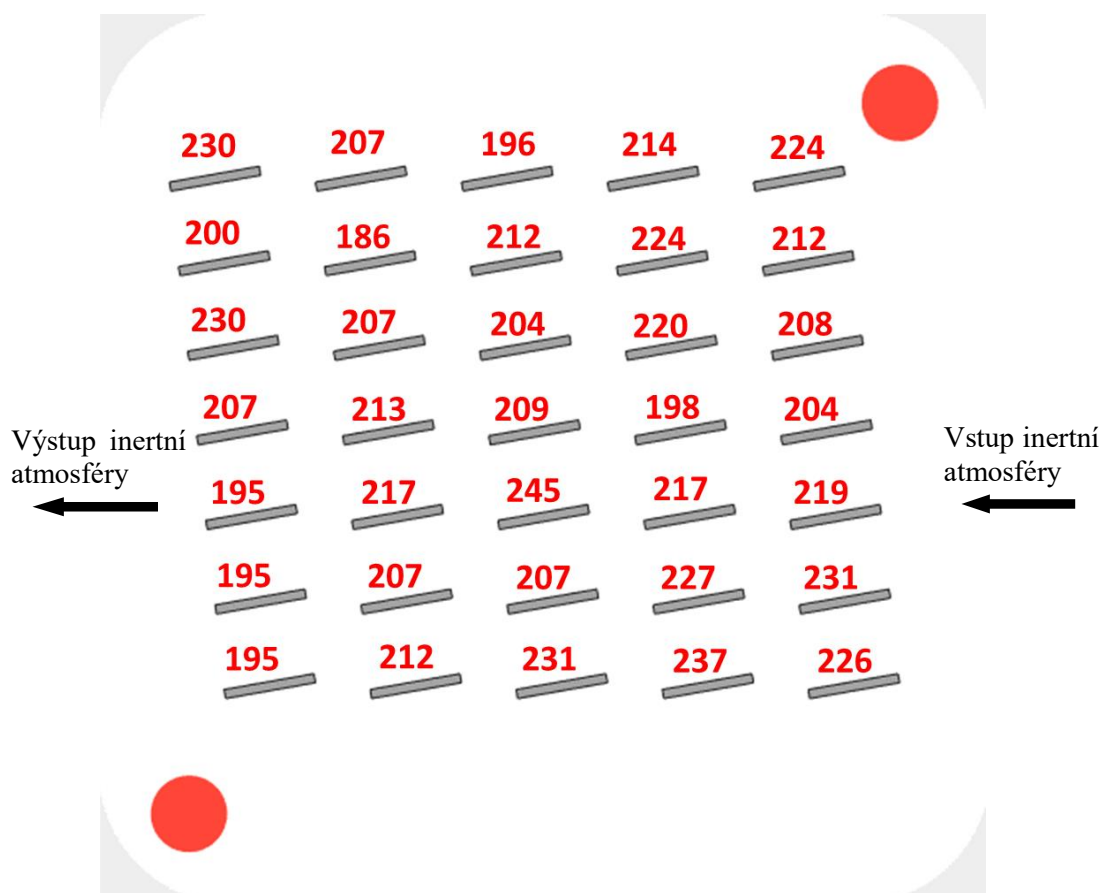
Každý vzorek je ve výbrusu reprezentován dvěma řezy tenkými stěnami. Na každém z nich bylo vyneseno 5 kót. Z odečtených hodnot byly vytvořeny aritmetické průměry, jejichž hodnoty jsou vyznačeny na obrázku platformy u příslušných vzorků. Pro pochopení a správnou interpretaci výsledků prvního testu tenkostěnných vzorků je nutné porovnání s výsledky druhého experimentu.



Obr. 5-8 Mapa tloušťky stěn TS vzorků (modře) na velké platformě (rozměry v μm)

5.4 Test TS vzorků č. 2

Na rozdíl od předchozího experimentu nebyly u vzorků druhého testu viditelné žádné rozdíly v kvalitě. Vzorky byly opět slepeny dohromady, zality a vybroušeny. Po nasnímání mikroskopem byly obdobným způsobem, jako v předešlém testu, změřeny tloušťky jednotlivých stěn. Jejich rozdělení je patrné na obr. 5-9.

Obr. 5-9 Mapa tloušťky stěn vzorků na malé platformě (rozměry v μm)

V následující tabulce jsou vypsané základní statistické údaje obou předchozích experimentů.

Tab. 5-3 Statistické údaje 1. a 2. testu tenkých stěn

Číslo experimentu	Průměr tloušťky stěn [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Variační koeficient
1	414,5	71,3	17,2 %
2	213,3	13,6	6,4 %

Jak je patrné, v prvním testu byla zaznamenána více než dvojnásobná variabilita získaných údajů než v testu druhém. Nejdůležitější zjištění je ovšem fakt, že aritmetický průměr hodnot získaných v prvním experimentu je téměř dvakrát větší oproti druhému experimentu. Pokud budeme uvažovat výsledky ze stavby na malé platformě jako optimální, můžeme říct, že kvalita stavby na velké platformě je zatížena chybou zhruba 50 %. Proto všechny následující experimenty probíhaly za použití malé stavební desky.

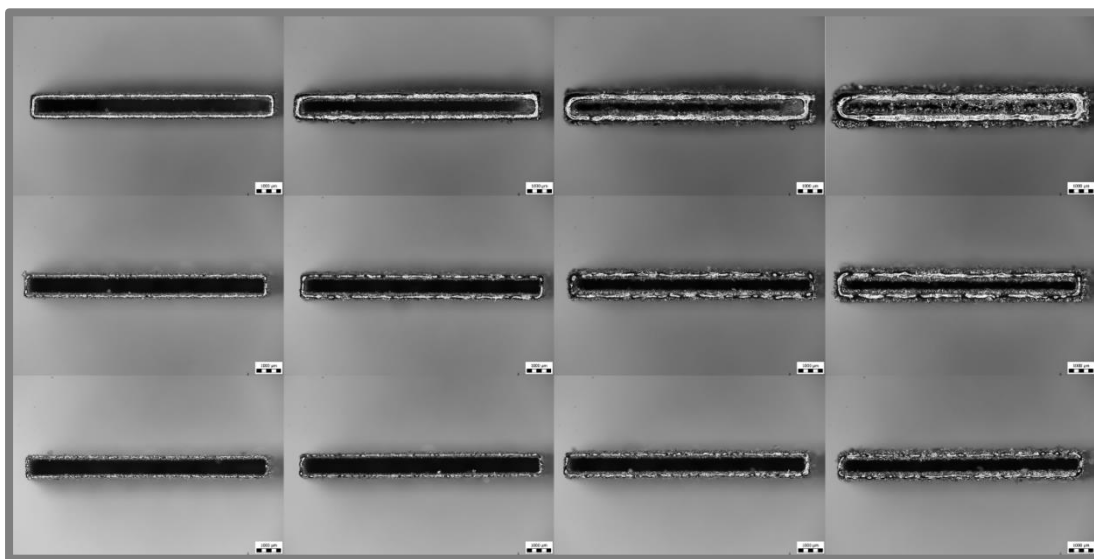
5.5 Test TS vzorků č. 3

Třetí experiment zahrnoval stavbu 48 vzorků s odlišnými procesními parametry, kterými byl výkon laseru a rychlost skenování. Způsob rozestavení vzorků na desce odpovídal předchozímu experimentu. Hodnoty jsou znázorněny v tabulce 5-4 včetně vypočítané plošné hustoty energie pro každý vzorek.

Tab. 5-4 Hustota energie jednotlivých vzorků

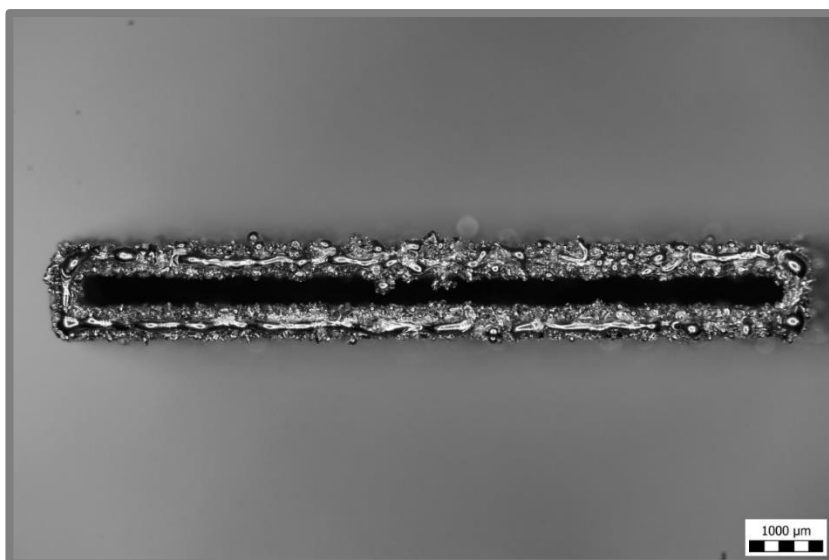
Plošná hustota energie [J/mm ²]					
		Výkon [W]			
		100	200	300	400
Rychlost skenování [mm/s]	150	13,33	26,67	40,00	53,33
	200	10,00	20,00	30,00	40,00
	300	6,67	13,33	20,00	26,67
	400	5,00	10,00	15,00	20,00
	500	4,00	8,00	12,00	16,00
	600	3,33	6,67	10,00	13,33
	700	2,86	5,71	8,57	11,43
	800	2,50	5,00	7,50	10,00
	900	2,22	4,44	6,67	8,89
	1000	2,00	4,00	6,00	8,00
	1100	1,82	3,64	5,45	7,27
	1200	1,67	3,33	5,00	6,67

Před odstraněním vzorků z platformy byly pořízeny snímky pomocí optického mikroskopu v horním pohledu, na kterém je vidět tvar posledního návaru. Na obr. 5-10 jsou vyobrazeni zástupci vzorků pro rychlost skenování 150, 500 a 1200 mm/s (shora dolů) a výkon laseru 100, 200, 300 a 400 W (zleva doprava).



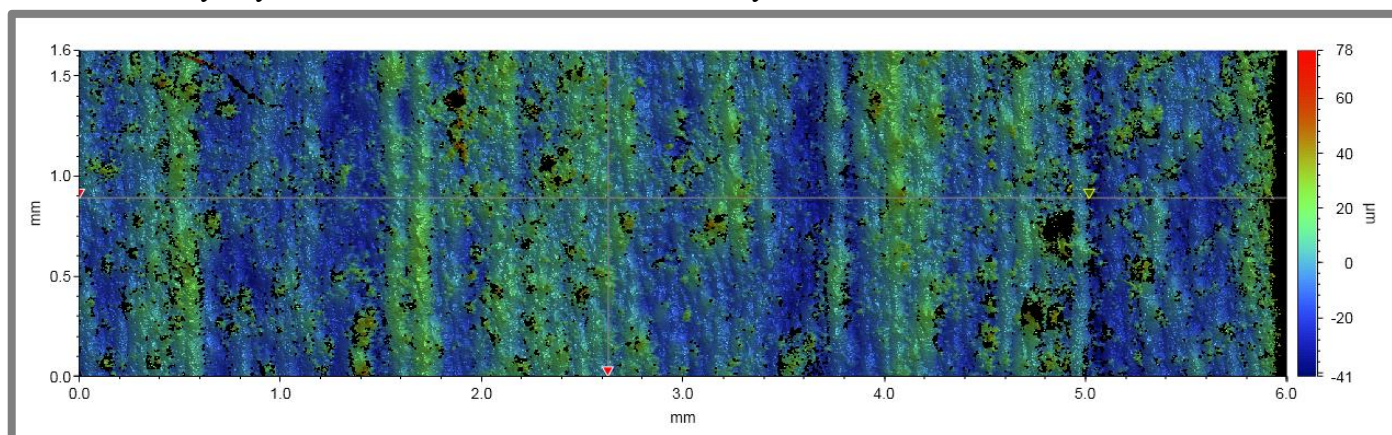
Obr. 5-10 Snímky vzorků z horního pohledu před odstraněním z platformy

Jak je patrné z obrázku, šířka návaru, a tedy i tloušťka stěny, se s rostoucím výkonem laseru zvětšuje a se vzrůstající rychlostí skenování klesá. Dále lze říci, že kontinuální návar je tvořen pouze do rychlosti skenování 400 mm/s. S přibývajícím rychlostí se návar začíná trhat bez ohledu na hodnotu výkonu. Tím lze částečně také vysvětlit výsledky objemového testu č. 1. Na obr. 5-11 je snímek TS vzorku tištěného s procesními parametry použitými ve zmíněném objemovém testu, u kterého byla očekávána nízká porozita. Konečný návar je přerušovaný a téměř zaniká, dále je zde velké množství napečeného prášku po stranách vzorku.



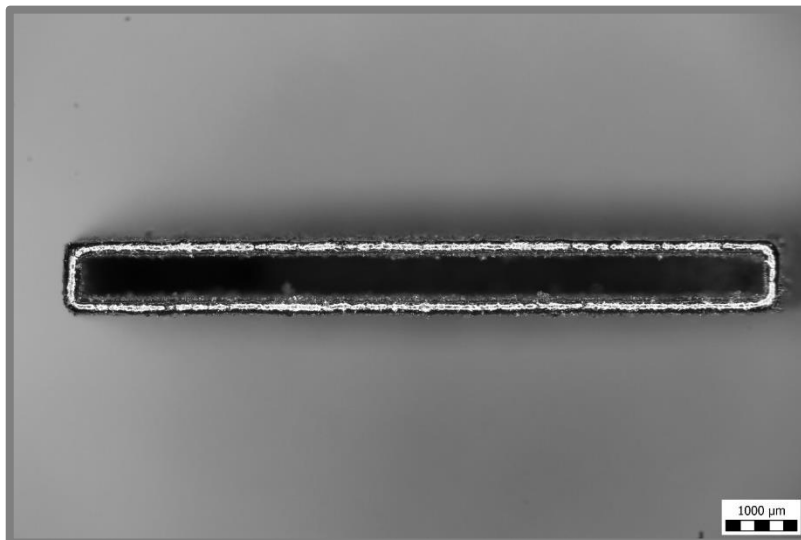
Obr. 5-11 Snímek vzorku v horním pohledu. Procesní parametry: výkon laseru = 400 W, rychlost skenování = 700 mm/s

Po odstranění vzorku z platformy a odbroušení podpor byla provedena analýza povrchu vzorku na bočních stěnách (kolmých k platformě). Ta probíhala za pomoci interferometrického profilometru. Vyhodnocovanými veličinami byla drsnost a vlnitost povrchu. Po základním nastavení zařízení byly provedeny čtyři snímky u každého vzorku, které byly následně automaticky spojeny do jednoho a vyhodnoceny. Výsledná nasnímaná oblast měla rozměry 5,8 x 1,6 mm.



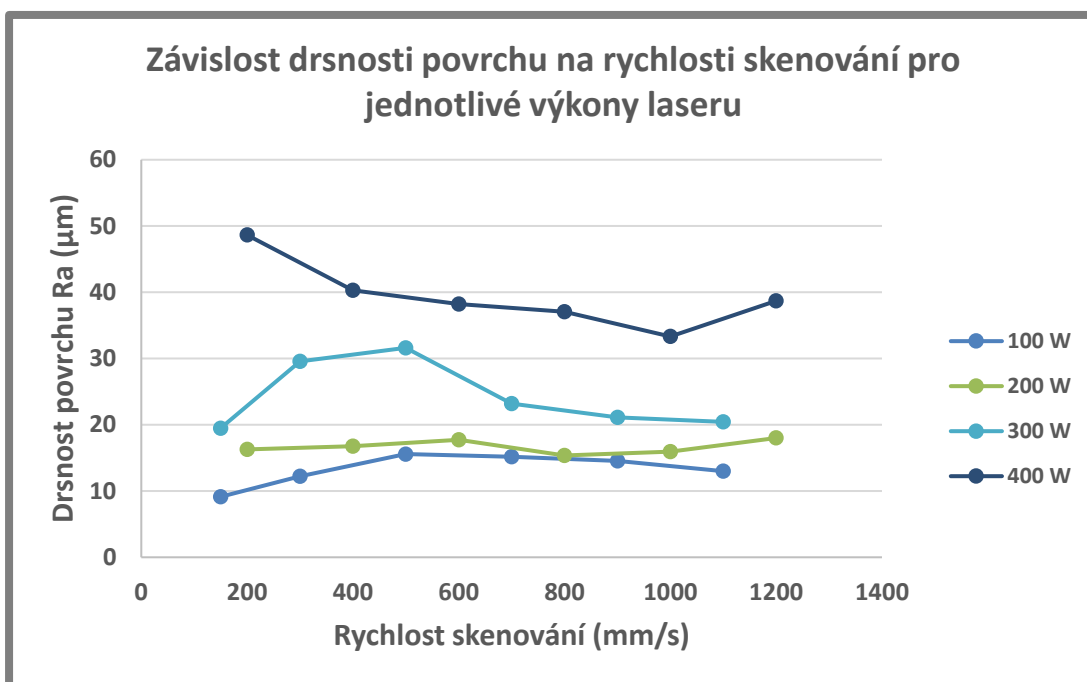
Obr. 5-12 Snímek pořízený interferometrickým profilometrem vzorku s nejnižší hodnotou drsnosti povrchu

Na obr. 5-12 je snímek povrchu vzorku, u kterého byla naměřena drsnost R_a 9,1 μm . Ten byl stavěn s výkonem laseru 100 W a rychlostí skenování 150 mm/s. Ze vzhledu návaru na obr. 5-13 je patrná jeho pravidelnost a kontinuálnost bez známek sintrovaných částic v jeho okolí.



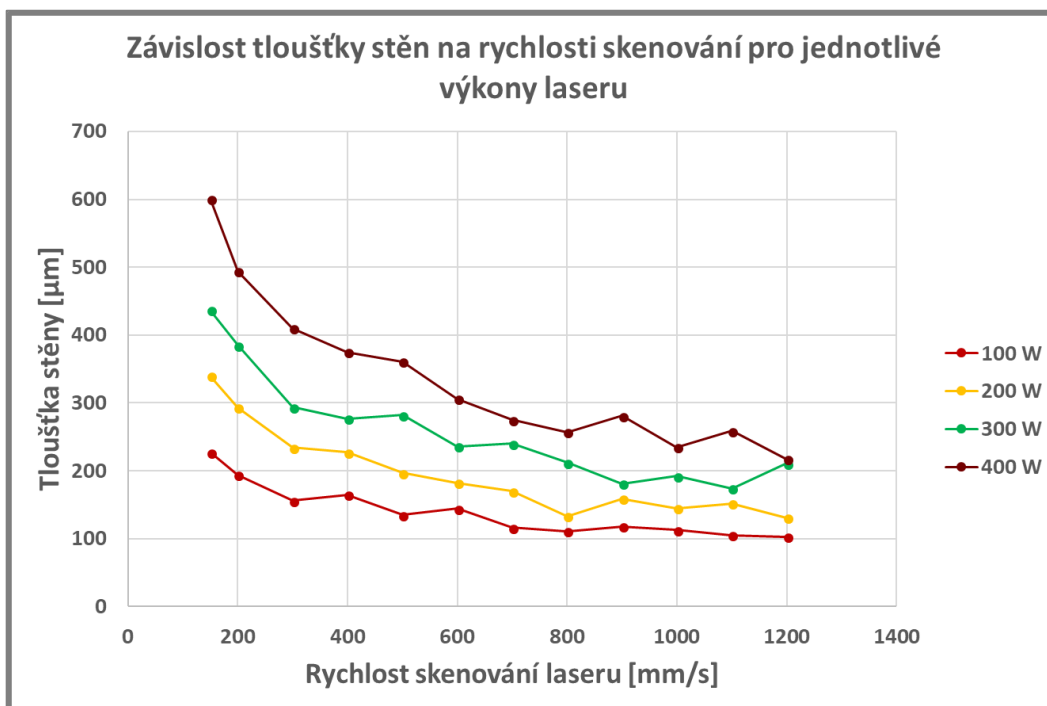
Obr. 5-13 Snímek vzorku s nejnižší hodnotou drsnosti povrchu

V grafu na obr. 5-14 je viditelný značný rozdíl v hodnotách drsnosti povrchu pro jednotlivé výkony. Lze tedy tvrdit, že s rostoucím výkonem laseru roste drsnost povrchu na bočních stěnách tenkostěnných vzorků. Co se týče závislosti drsnosti povrchu na rychlosti skenování, nelze vyvodit jednoznačný závěr.



Obr. 5-14 Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru

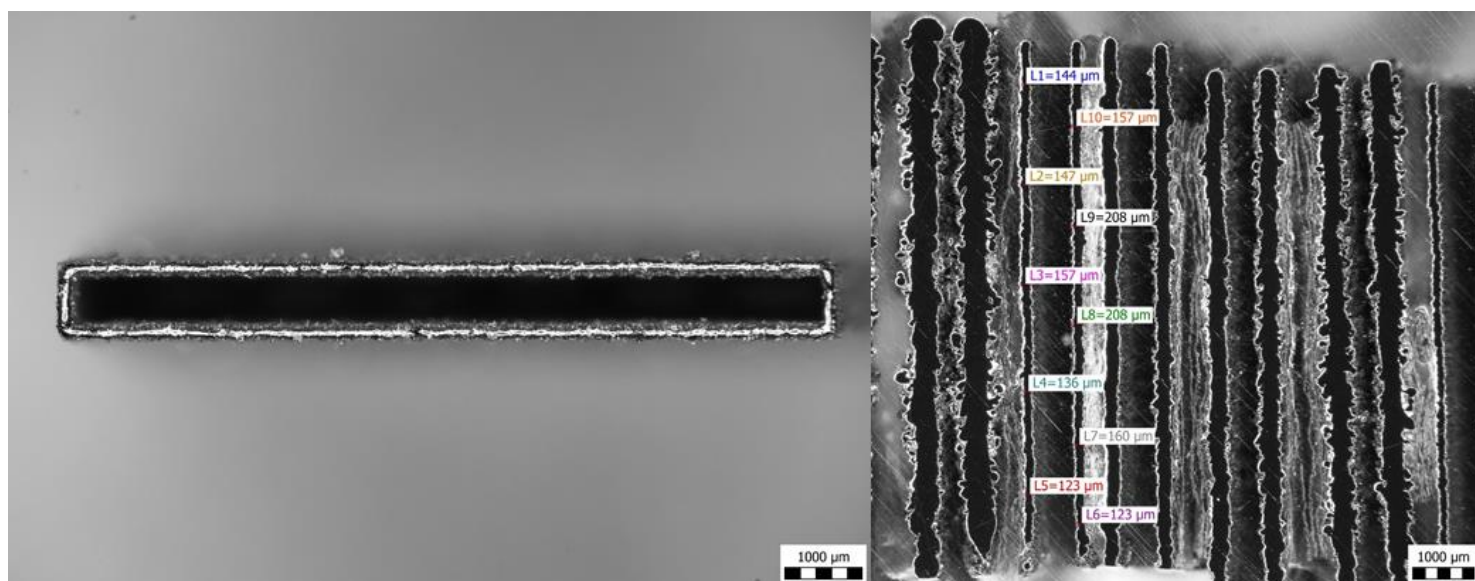
Po nasnímání metalografických výbrusů vzorků bylo provedeno 5 měření na každé z tenkých stěn a průměrné hodnoty byly poté vyneseny do grafu závislosti tloušťky stěn na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru.



Obr. 5-15 Graf závislosti tloušťky stěn na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony

Z grafu vyplývá, že tloušťka stěn klesá s rostoucí rychlostí skenování a klesajícím výkonem laseru.

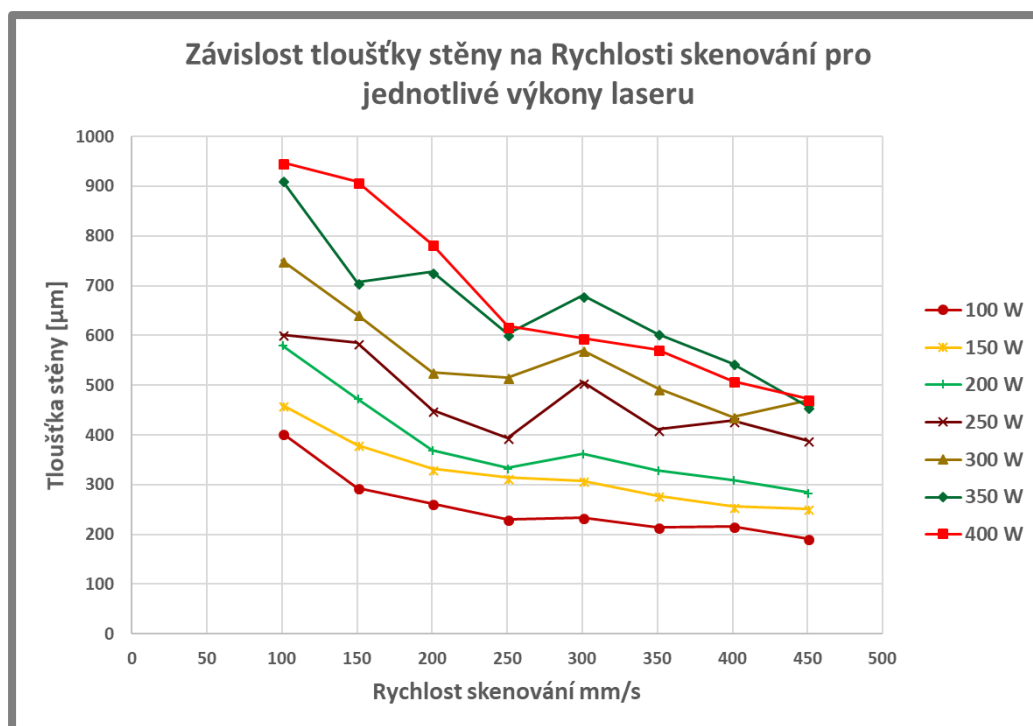
Jako optimální procesní parametry pro tisk tenkých stěn tvořených jedním návarem byla vybrána kombinace výkonu laseru 100 W a rychlosti skenování 300 mm/s. Vzorek dosáhl druhé nejnížší drsnosti povrchu $R_a = 12,2 \mu\text{m}$ a tloušťky stěny $156 \mu\text{m}$.



Obr. 5-16 Nejvíce perspektivní TS vzorek tvořený jedním návarem

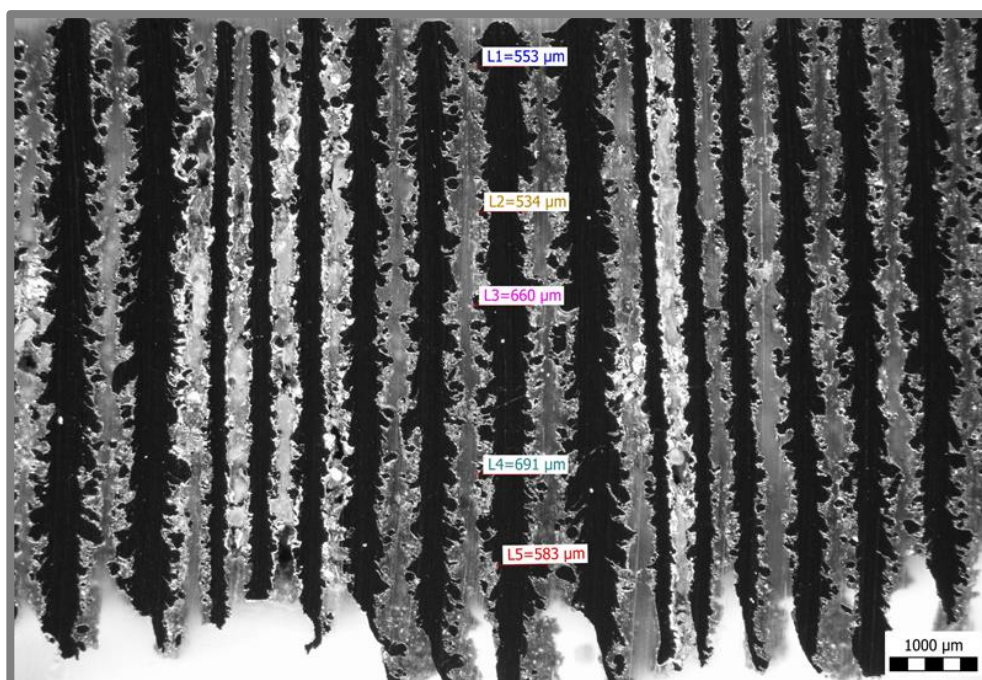
5.6 Test TS vzorků tvořených dvojím skenováním laseru

V rámci daného experimentu bylo vyrobeno a vyhodnoceno 56 vzorků, kde výkon laseru nabýval hodnot od 100 do 400 W po 50 W. Oproti předchozímu testu byl zvolen menší krok výkonu pro přesnější zmapování vlivu výkonu na tloušťku stěn. U rychlosti skenování byl krok také snížen na polovinu a snížena byla také horní hranice, na základě zjištění z předešlého experimentu, na 450 mm/s. Po nasnímání výbrusu byl sestaven graf závislosti tloušťky stěn na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru.



Obr. 5-17 Graf závislosti tloušťky stěny na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru

V grafu je opět patrný klesající trend křivek s rostoucí rychlostí skenování. Jsou zde však zaznamenány výkyvy hodnot, které jsou pravděpodobně způsobeny volbou místa měření tloušťky. V tomto případě byl povrch vzorků daleko více členitý, jak můžeme vidět v řezu na obr. 5-18.



Obr. 5-18 Výbrus tenkých stěn tvořených dvěma návary

Následující tabulky slouží pro srovnání hodnot tloušťky TS vzorků tvořených jedním a dvojím skenováním laseru pro stejné kombinace procesních parametrů.

Tab. 5-5 Tloušťka stěn vzorků tvořených jedním návarem

Tloušťka stěny [μm]					
		Výkon			
		100 W	200 W	300 W	400 W
Rychlost skenování [mm/s]	150	227	340	437	601
	200	194	293	385	494
	300	156	234	294	410
	400	165	227	277	375

Tab. 5-6 Tloušťka stěn vzorků tvořených dvojím skenováním laseru

Tloušťka stěny [μm]					
		Výkon			
		100 W	200 W	300 W	400 W
Rychlost skenování [mm/s]	150	294	474	643	909
	200	262	370	526	783
	300	234	363	570	595
	400	217	310	437	509

Jak je patrné, lamely tvořené dvěma přejezdy laseru v každé vrstvě dosahují značně vyšších hodnot tloušťky, v některých případech až o stovky mikronů. Vlivem dvojnásobného přejezdu je prášku dodávána větší energie a vytváří se tak širší návar (svarová lázeň nestihne před aplikací druhého přejezdu laseru ztuhnout). S dvojnásobnou dodanou energií je spojeno i větší množství částic napečených na bocích vzorků. Proto je povrch více členitý, a to zejména u vzorků s vyšším výkonem laseru.

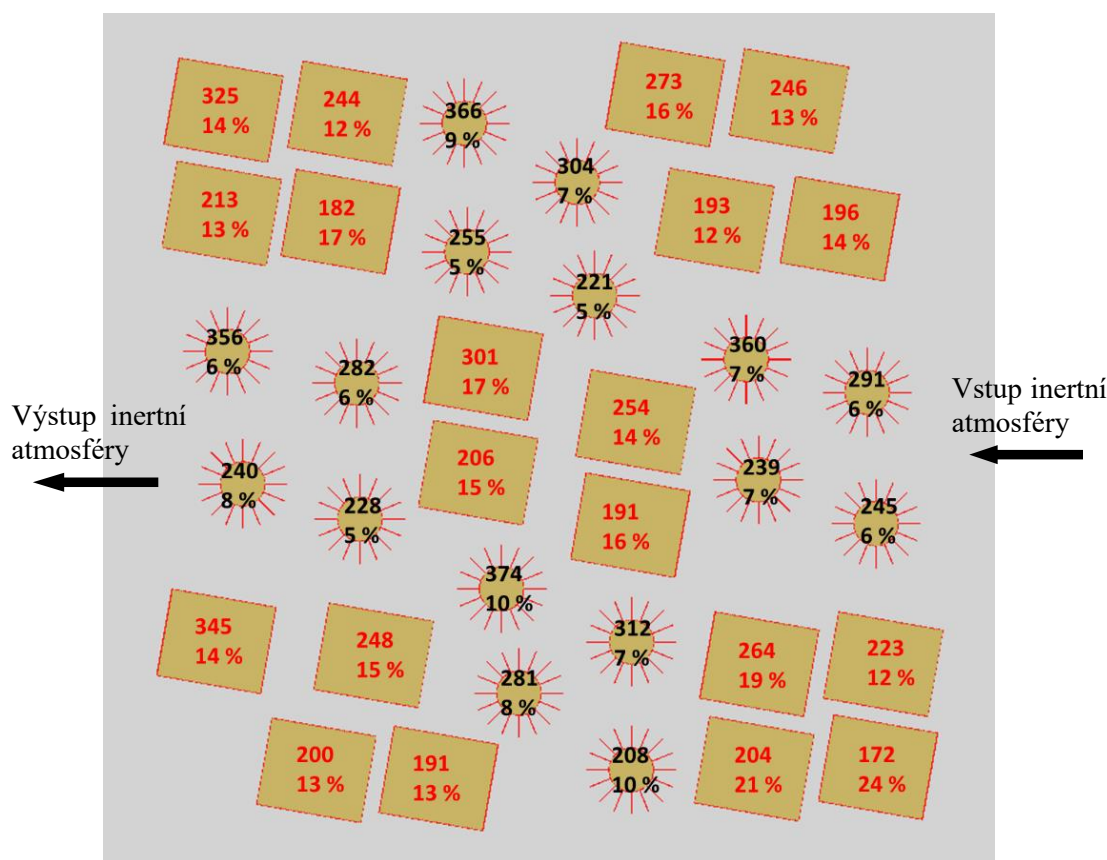
Jako optimální byla vybrána kombinace výkonu laseru 100 W a rychlosti skenování 400 mm/s. Vzorek vyrobený danými procesními parametry dosáhl tloušťky stěny 217 μm a drsnosti povrchu $R_a = 13 \mu\text{m}$.

5.7 Statistický test

Pro statistický test byly kromě výše specifikovaných optimálních procesních parametrů použity 3 další, viz kapitola 4.6. Důvodem byly hodnoty drsnosti povrchu R_a , které byly u daných kombinací výkonu a rychlosti laseru nižší, což by mohlo vést k dosažení užší mezery mezi dvěma tenkými stěnami.

Nejprve byl sledován vliv úhlu natočení tenké stěny v horizontální rovině na tloušťku stěny. I když byly zaznamenány drobné rozdíly hodnot, nedošlo k jejich opakování u jiných vzorků. Navíc se rozměry jednotlivých lamel lišily maximálně o pár desítek mikrometrů, což lze také přičíst chybě v měření, či broušení, které bylo u takto navržené geometrie vzorků obtížné.

Hodnoty tloušťky stěny byly pro každý vzorek zprůměrovány a zakresleny do mapy rozestavených vzorků na platformě včetně variačních koeficientů.



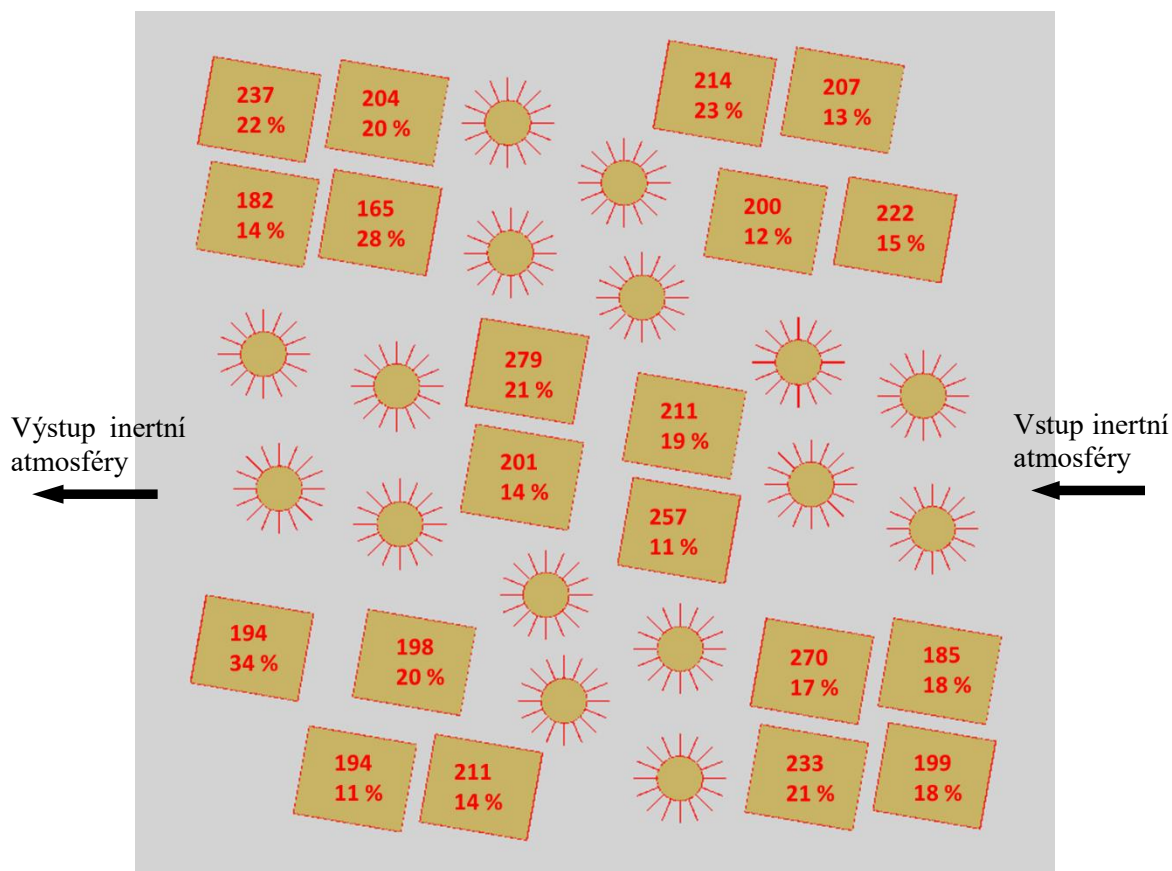
Obr. 5-19 Průměrné hodnoty tloušťky stěny v μm s variačním koeficientem v %

Variační koeficienty u válcových vzorků dokazují nízkou diferencí tloušťek stěn, jak bylo zmíněno v předchozím odstavci. U hřebenových vzorků jsou již odchylky větší, na druhou stranu průměr tloušťek je menší než u válců, a to u každého zástupce stejných procesních parametrů. Je zřejmé, že volba geometrie dílu a vzájemného uspořádání lamel hraje roli na výslednou tloušťku stěn. Proto byly zprůměrovány hodnoty obou typů vzorků pro jednotlivé kombinace procesních parametrů a výsledek je v tabulce 5-6.

Tab. 5-6 Statistické hodnoty tloušťky stěn,
výkon laseru konstantní 100 W

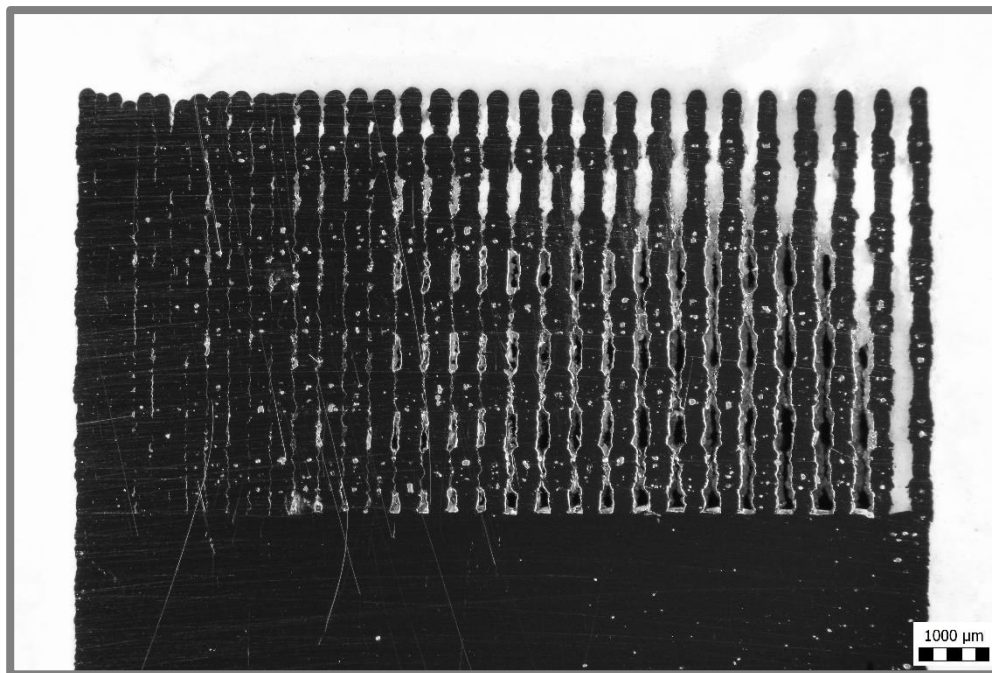
	Rychlost skenování [mm/s]			
	100	200	300	400
Průměrná tloušťka stěny [μm]	335	269	228	205
Směr. odchylka [μm]	58,6	44,1	40,2	36,2
Var. koeficient	17 %	16 %	18 %	18 %

Dále byl sledován vliv umístění vzorku v rámci stavebního prostoru na tloušťku stěn. Nebyly však shledány významné odchylky, které by se opakovaly u všech skupin procesních parametrů. Na následujícím obrázku jsou zaznamenány nejmenší dosažené mezery u každého hřebenu, tedy ty, kde nebylo shledáno propojení sousedních lamel.



Obr. 5-20 Průměrné šířky nejužších dosažených mezer

Zde je zaznamenána větší variabilita výsledků. Jak můžeme vidět na následujícím obrázku, u některých vzorků tloušťka stěn pravidelně klesala a narůstala. Tento jev se nepodařilo žádným způsobem vysvětlit. Stavba vzorků proběhla bez přerušování. Prášek v nanášecím zařízení nebyl doplňován, jeho množství stačilo pro dokončení stavby. Nebyly zde tedy žádné prodlevy při doplňování prášku z hlavního zásobníku. Celý test proběhl standardně a další řešení tohoto fenoménu zasahuje nad rámec této práce.



Obr. 5-21 Výbrus hřebenového vzorku

V následující tabulce jsou opět zprůměrované hodnoty pro jednotlivé procesní parametry.

Tab. 5-7 Statistické hodnoty nejužších mezer,
výkon laseru konstantní 100 W

	Rychlost skenování [mm/s]			
	100	200	300	400
Průměrná šířka mezery [μm]	239	201	201	210
Směr. odchylka [μm]	64,1	38	35,7	46,4
Var. koeficient	27 %	19 %	18 %	22 %

Drobné rozdíly v drsnosti povrchu (1-3 μm) daných procesními parametry očividně nehrají významnou roli, vzhledem k nejvyšší průměrné hodnotě šířky mezery dosažené u vzorku s nejnižší naměřenou drsností povrchu v předchozích experimentech. Samotné rozdíly hodnot mezi jednotlivými procesními parametry jsou jen nepatrné. Tento test tedy nijak nevyvrací závěr z experimentu z kapitoly 5.6 označujícím kombinaci výkonu laseru 100 W a rychlosti skenování 400 mm/s jako optimální a doplňuje jej tak o hodnotu nejužší tisknutelné mezery mezi dvěma stěnami vyrobenými danými procesními parametry 210 μm.

5.8 Test šikmých TS vzorků

První sada vzorků odhalila předpokládané rozdíly mezi vzorky stavěnými kolmo a pod úhlem. Následující tabulka ukazuje rozdíl v tloušťce stěn.

Tab. 5-8 Porovnání tloušťky stěny vzorků stavěných kolmo a pod úhlem

ID	Tloušťka stěny [μm]	
	Úhel stavby 90°	Úhel stavby 45°
1	283	294,8
2	363,2	452,8
3	325,8	384,6
4	299,2	350,2
5	153,6	169,4
6	204,4	260,8
7	255	316,2
8	142,8	118,4
9	252,8	256

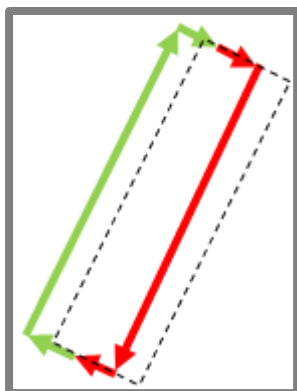
Dle předpokladu byla u vzorků stavěných pod úhlem naměřena větší tloušťka stěn, kromě vzorku č. 8. U tohoto vzorku však došlo vlivem nízké dodávané energie k poškození a byla postavena pouze jeho polovina, zbylé vrstvy byly po přejezdu nanášecího zařízení odneseny mimo vzorek. Stejně tak došlo ke zhoršení drsnosti povrchu Ra, jak ukazuje tabulka 5-10.

Tab. 5-9 Porovnání drsnosti povrchu vzorků stavěných kolmo a pod úhlem

ID	Drsnost povrchu Ra [μm]		
	Úhel stavby 90°	Úhel stavby 45° horní strana	Úhel stavby 45° spodní povrch
1	25,5	21,3	18
2	23,1	27,3	58,9
3	17,7	24,1	39,8
4	27,7	42,7	63,3
5	19,8	25,6	32,2
6	29,4	23,4	40,2
7	26,8	38,9	36,7
8	18,1	28	32,8
9	20,9	32,2	36,5

Jak je patrné, spodní strana vzorků dosahuje ve většině případů horší kvality povrchu, což vychází z principu stavby šikmých ploch technologií SLM. Přírůstky v jednotlivých vrstvách tvořící spodní stěnu jsou neustále v kontaktu s práškem, jehož částice se na návar ze spodní strany nabalují. Z horní strany je návar v kontaktu pouze s atmosférou, zůstává tedy hladký, což způsobuje rozdíly v kvalitě povrchu výsledné šikmé stěny.

V další fázi bylo vytištěno 43 vzorků, kde byly testovány separátní procesní parametry pro spodní povrch šikmých stěn, tzv. downskin. Při přípravě dat k tisku bylo zjištěno, že software Magics umožňuje tuto aplikaci provést pouze v případě, že hraniční návary neleží v jednotlivých vrstvách přímo na sobě. Pro úhel sklonu vzorku 45° a počet předchozích vrstev použitých pro výpočet parametrů „downskinu“ (tzv. layer reference) rovnu 1 je nutné nastavit rozestup mezi hraničními návary minimálně $60\text{ }\mu\text{m}$. Pokud je počet referenčních vrstev zahrnutý do kalkulace roven 2, musí být rozestup návarů minimálně $120\text{ }\mu\text{m}$. Tím dojde k nárůstu výsledné tloušťky stěny a to o hodnotu rozestupu vynásobenou $\cos(45^\circ)$. V prvním případě o $42\text{ }\mu\text{m}$, v druhém o $85\text{ }\mu\text{m}$. Proto byly také postaveny kolmé tenké stěny s nastavenými rozestupy mezi návary $42\text{ }\mu\text{m}$ a $85\text{ }\mu\text{m}$, jelikož není možné hodnotu daného parametru měnit v rámci jednoho materiálového souboru. Pro základní hraniční návary byl nastaven výkon laseru 100 W a rychlost skenování 400 mm/s na základě předchozích experimentů. Parametry pro hraniční návary spodních stěn jsou znázorněny v tabulce s výsledky experimentu. Pro porovnání byla na stavěcí desku také přidána šikmá stěna bez aplikace speciální procesních parametrů pro spodní povrch. Na obr. 5-22 je schéma znázorňující trasu laseru v jedné z vrstev (šipky) s předchozí vrstvou značenou čárkovaně. Zelenou barvou jsou znázorněny procesní parametry pro spodní vrstvu, které jsou v tomto testu proměnné, červenou pak základní hraniční návar, u kterého jsou procesní parametry konstantní.



Obr. 5-22 Schéma trasy laseru (šipky) s předchozí vypálenou vrstvou (čárkovaně)

Tab. 5-10 Tloušťka šikmých stěn s upravenými procesními parametry pro spodní povrch vzorků

		Tloušťka stěny [μm]			
		Počet referenčních vrstev = 1		Počet referenčních vrstev = 2	
	Výkon \rightarrow	100 W	200 W	100 W	200 W
Rychlost skenování [mm/s]	100	297,8	537,8	316,6	632,6
	200	235,8	387,6	224	383,8
	300	200,4	295,4	226,4	329
	400	203,6	265,6	210,2	262,4
	500	164,8	251	195,4	278
	600	190	242	174,4	267,6
	700	167,4	207,6	141,4	227,2
	800	159	194,8	153,6	205
	900	154,6	194,2	153,4	231,2
	1000	141,8	220,2	155	202,2

Z výsledků je opět patrný rozdíl při použití výkonu laseru 100 a 200 W. Skupina vzorků, u kterých byl počet referenčních vrstev pro výpočet „downskinu“ roven 2, dosahovala vyšších hodnot tlouštěk stěn, k čemuž pravděpodobně nejvíc přispěl větší rozestup mezi hraničními návary. Důležitější jsou výsledky analýzy drsnosti povrchu, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 5-12.

Tab. 5-11 Drsnost povrchu spodní strany vzorku

		Drsnost povrchu Ra [μm]			
		Počet referenčních vrstev = 1		Počet referenčních vrstev = 2	
	Výkon \rightarrow	100 W	200 W	100 W	200 W
Rychlost skenování [mm/s]	100	11	25	15	28
	200	12	23	14	21
	300	16	18	21	16
	400	22	28	25	32
	500	20	29	21	29
	600	21	25	20	25
	700	20	22	20	22
	800	20	20	19	21
	900	19	19	18	20
	1000	19	21	18	18

Ve většině případů se hodnota Ra pohybuje kolem 20 μm , avšak u dvou vzorků, u kterých byl nastaven počet referenčních vrstev = 1, výkon 100 W a rychlost skenování 100 respektive 200 mm/s, bylo dosaženo drsnosti povrchu Ra 11 respektive 12 μm . To je v porovnání s hodnotou Ra = 36 μm naměřenou u šikmé stěny bez aplikace speciálních procesních parametrů pro spodní povrch vzorku značné zlepšení. Více vhodné se jeví užití rychlosti skenování 200 mm/s, při které byla pro výše

zmíněné procesní parametry dosáhnuta tloušťka vzorku 236 μm , která je srovnatelná s hodnotou 205 μm vycházející ze statistického testu kolmých stěn.

5.9 Test objemových vzorků

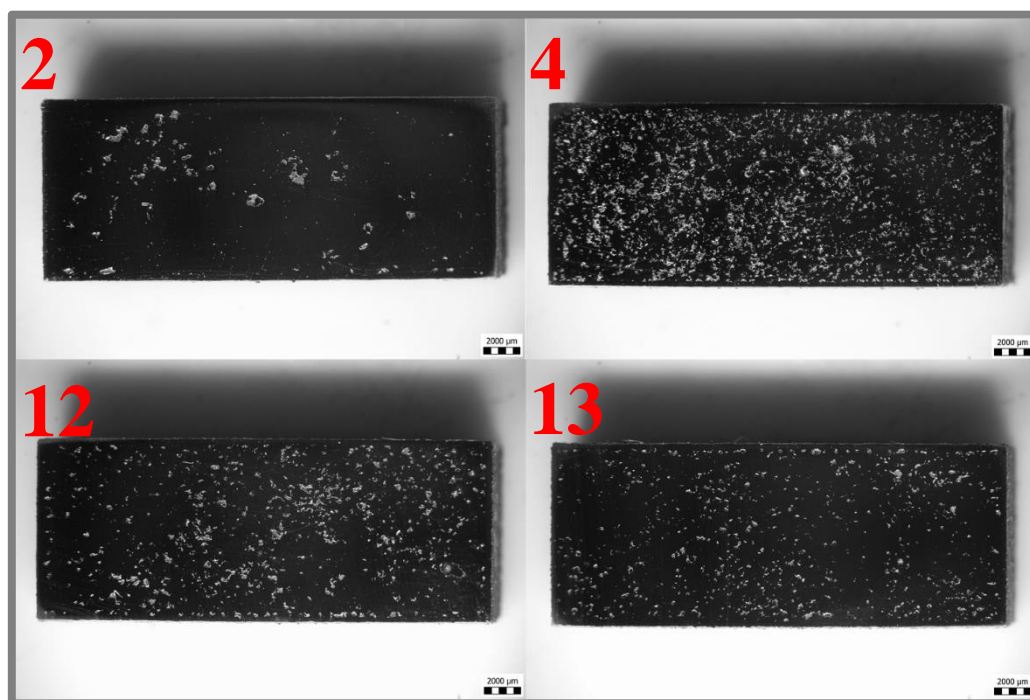
Jak bylo zmíněno v kapitole 4.5.2, z testu TS vzorků č. 3 byly vybrány procesní parametry produkující kvalitní návar pro výplň vzorků objemových. Kromě výkonu laseru a rychlosti skenování, vstupuje do testu také třetí proměnná, a to vzdálenost šraf. Její hodnota byla určena jako polovina tloušťky TS vzorku pro danou kombinaci procesních parametrů. Byla použita tzv. stripe strategie šrafování s délkou šrafovacího pole 10 mm a natočením v každé vrstvě o 33°. Tato strategie byla použita u všech objemových vzorků. Bylo vyrobeno 8 vzorků a změřena porozita, jejíž hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5-12 Tabulka použitých procesních parametrů a dosažené porozity

ID	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	Vzdálenost šraf [μm]	Hustota energie [J/mm^3]	Porozita [%]
1	100	150	113	118	5,4
2	100	200	97	104	19,1
3	200	200	147	137	0,45
4	100	300	98	85	13,3
5	200	300	117	114	0,18
6	100	400	82	61	7,4
7	200	400	114	88	1,5
8	100	500	68	59	16,5

U vzorku číslo 3 a 5 bylo dosaženo nejnižších hodnot porozity. Vzhledem k vyšší rychlosti a o 0,27 % nižší hodnotě porozity byly jako perspektivní zvoleny procesní parametry vzorku č. 5. Tyto parametry byly použity pro výrobu vzorků pro měření magnetických vlastností viz následující kapitola. Paralelně byl proveden další test objemových vzorků s cílem zkrátit výrobní čas.

Procesní parametry použité pro stavbu patnácti objemových vzorků v třetím testu sice vedly ke snížení doby tisku, avšak na úkor výskytu porozity. U každého vzorku bylo viditelné značné množství defektů, viz obr. 5-23.



Obr. 5-23 Snímky výbrusu vzorků se značnou porozitou včetně čísla vzorku

Po nasnímání vzorků bylo zbytečné provádět analýzu porozity. Nebylo dosaženo požadovaného výsledku, proto byl proveden v závěru výzkumu poslední experiment. Při stavbě objemových vzorků bylo nutné také zjistit optimální procesní parametry pro hraniční návary, které by zajišťovaly co nejlepší kvalitu povrchu na kolmých stěnách. U objemového testu č. 2 byl použit výkon laseru 100 W a rychlost skenování 150 mm/s na základě nejnižší hodnoty drsnosti povrchu u takto vyrobeného TS vzorku. To vedlo k vytvoření kvalitního povrchu objemových vzorků, naměřená hodnota R_a činila 13,1 μm . U dalších testů ovšem byly použity jiné procesní parametry, a to z následujícího důvodu. Pokud budeme tisknout díl, který bude vytvořen kombinací tenkostěnných a objemových prvků, máme dvě možnosti přístupu. První variantou je CAD model virtuálně rozdělit na separátní modely tenkých stěn a objemových prvků a těm přiřadit rozdílné materiálové soubory. Tento postup je ovšem velice náročný, pokud se jedná o složitou geometrii, jakou je například jádro magnetoreologického tlumiče popsané v další kapitole. Proto bylo přistoupeno k variantě č. 2, tedy vytvoření materiálového souboru, který bude možné použít pro celý model a zajistí kvalitní výrobu obou typů geometrie. Tím pádem byla u objemového testu č. 3 použita pro hraniční návary skenovací rychlost 400 mm/s a výkon 100 W. Vzhledem k nízké tloušťce takto vytvořených návarů byl jejich počet na hranicích objemů zdvojnásoben. Vzdálenost mezi střednicemi návarů byla nastavena na hodnotu 80 μm . Drsnost povrchu tímto způsobem dosáhla hodnoty 12 μm .

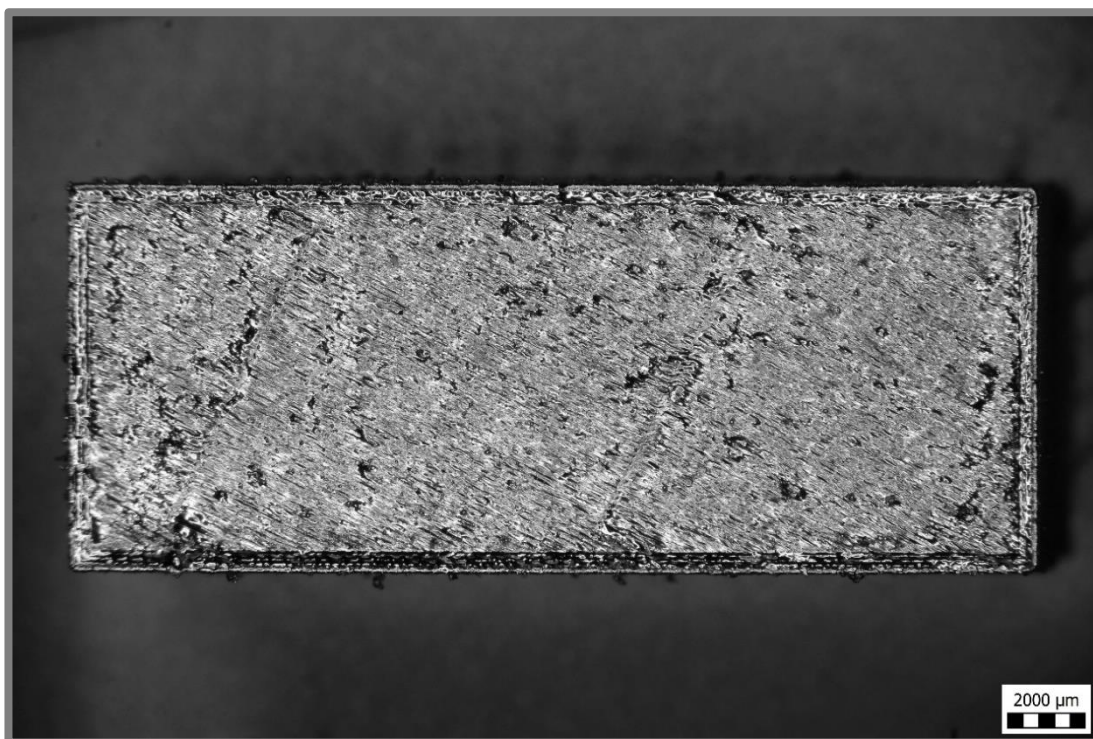
Pro objemový test č. 4 bylo vyrobeno dohromady 6 vzorků a již na první pohled u nich došlo ke snížení porozity v porovnání s předešlým experimentem. Jako

nejlepší byl vyhodnocen vzorek č. 5, u kterého byla naměřena porozita 0,1 %. Přehled procesních parametrů a výsledků je uveden v následující tabulce.

Tab. 5-13 Přehled použitých procesních parametrů a dosažené porozity

ID	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	Vzdálenost šraf [μm]	Hustota energie [J/mm ³]	Porozita [%]
1	400	750	90	119	1,2
2	300	300	147	136	0,3
3	300	350	142	121	0,4
4	300	400	138	109	0,6
5	300	450	140	95	0,1
6	300	500	141	85	1,6

Doba tisku kostky o objemu 1 cm³ by se použitím nových procesních parametrů zkrátila z původních 9,3 na 5,1 minut (bez započítání doby nanášení), tedy o 45 %. Zhoršení ovšem nastalo u kvality povrchu vzorků, kde bylo naměřeno $R_a = 31,5 \mu\text{m}$. To je dáno množstvím napečených částic kolem šrafovacích návarů v místě, kde se výplň potkává s hraničními návary. Problém by mohl být vyřešen přidáním dalších hraničních návarů, a tedy větším odsazením objemové výplně od krajních stěn. To by ovšem mohlo mít neblahý vliv na kvalitu horní strany dílů. Jak si můžeme všimnout na obr. 5-24, hraniční návary jsou v konečné vrstvě vystouplé a s jejich zvyšujícím počtem by se jev umocňoval.



Obr. 5-24 Vystouplé hraniční návary horní vrstvy objemového vzorku

Jako vhodnější se jeví tzv. Hull and Core strategie, tedy obalu a jádra, u které dojde k rozdělení objemu na dvě soustředné části (vnitřní a vnější), kterým lze přiřadit rozdílné procesní parametry. Tato strategie však z časového důvodu nebyla testována.

5.10 Testy magnetických vlastností

Toroidy pro porovnání magnetických vlastností plného materiálu a struktury byly tisknuty za použití Palouškových procesních parametrů. Pouze u strukturovaného jádra byly na hraniční návary nastaveny již nově zjištěné parametry pro tisk tenkých stěn tvořených dvojím skenováním laseru. Toroidy byly za účelem měření rozříznuty v polovině pomocí drátové řezačky. Na obr. 5-25 jsou viditelné póry v objemových částech.



Obr. 5-25 Rozříznuté jádro pomocí drátové řezačky a náhled do vnitřní struktury

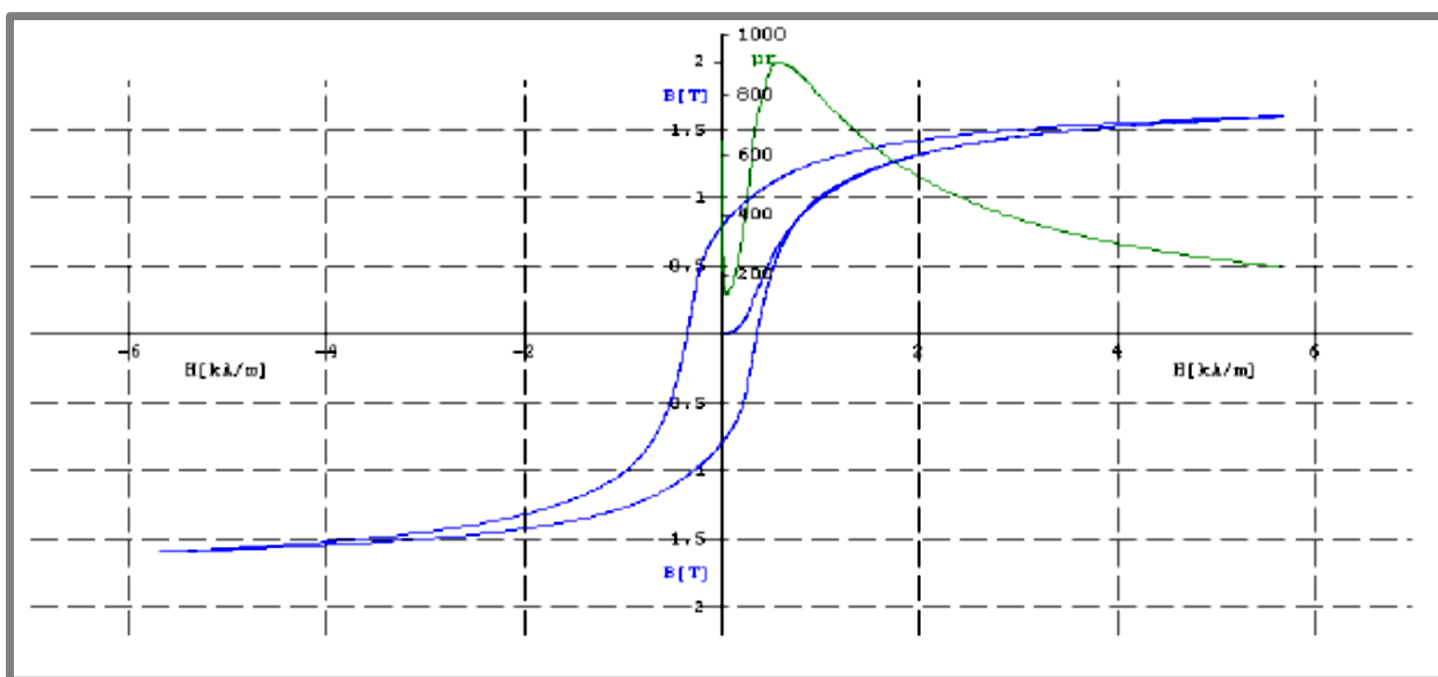
Při detailnějším pohledu je patrné, že se tenké stěny vlivem zbytkového napětí odchýlily od kolmého směru a způsobily tak nerovnoměrné uspořádání objemových prvků.



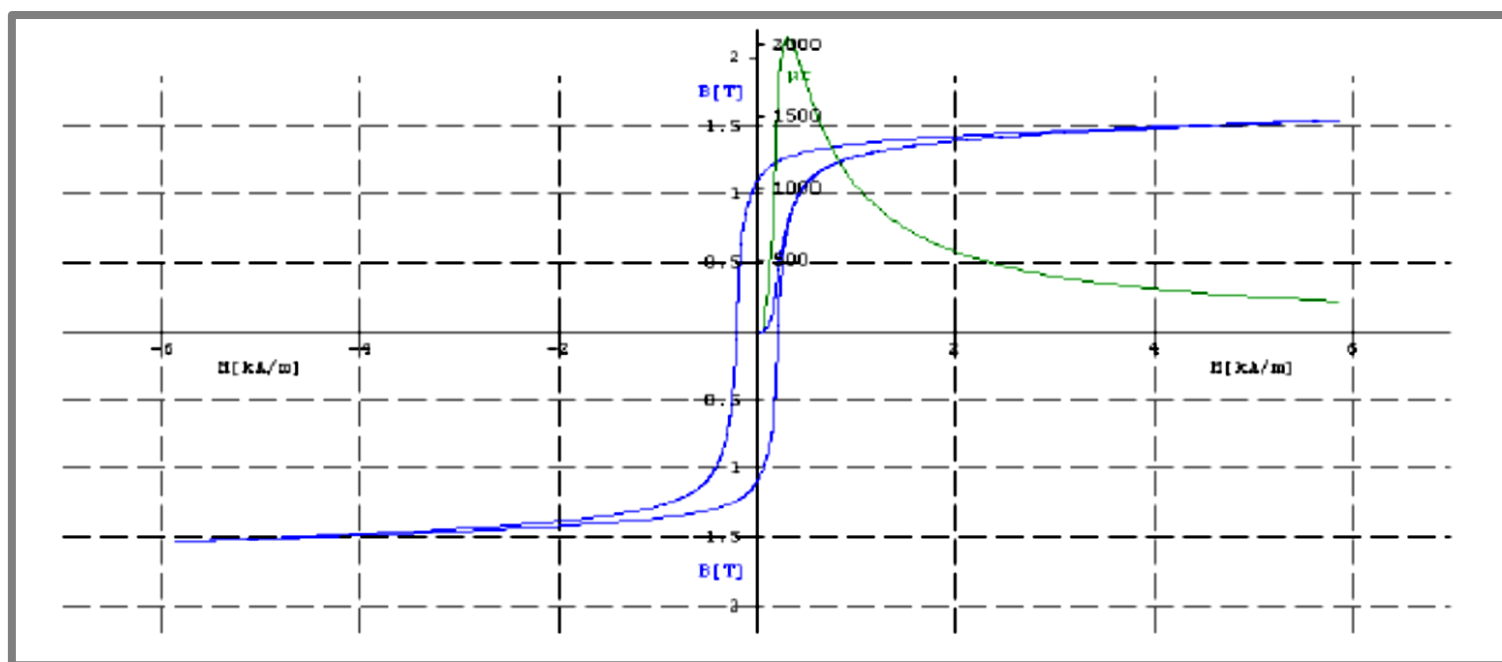
Obr. 5-26 Mezery mezi objemovými prvky jsou v jednom směru širší než v druhém

Toto zjištění vedlo k úpravě následujících modelů přidáním většího množství zpevňujících prvků mezi objemovými částmi pro zajištění větší stability geometrie. Popis experimentů potvrzujících zlepšení magnetických vlastností užitím strukturované geometrie je uveden v práci Vítka.

V další fázi byly vytištěny prstence s vnějším průměrem 40 mm, vnitřním 34 mm a výškou 5 mm. Procesní parametry prvního páru byly nastaveny podle Palouška s nově upravenými hraničními návary. Pro druhý pár byly použity parametry zjištěné v experimentu objemových vzorků č. 2. Po tepelném zpracování byly díly odeslány na VŠB – Technickou univerzitu Ostrava, kde byla provedena měření B-H křivek. Na jejich základě pak bylo zjištěno, že procesní parametry a s nimi spojené množství obsažených pórů v objemu nemají téměř žádný vliv na tvar B-H křivky. Proto jsou na následujících obrázcích grafy znázorňující rozdíl mezi žíhaným a nežíhaným stavem, kde je rozdíl patrnější.

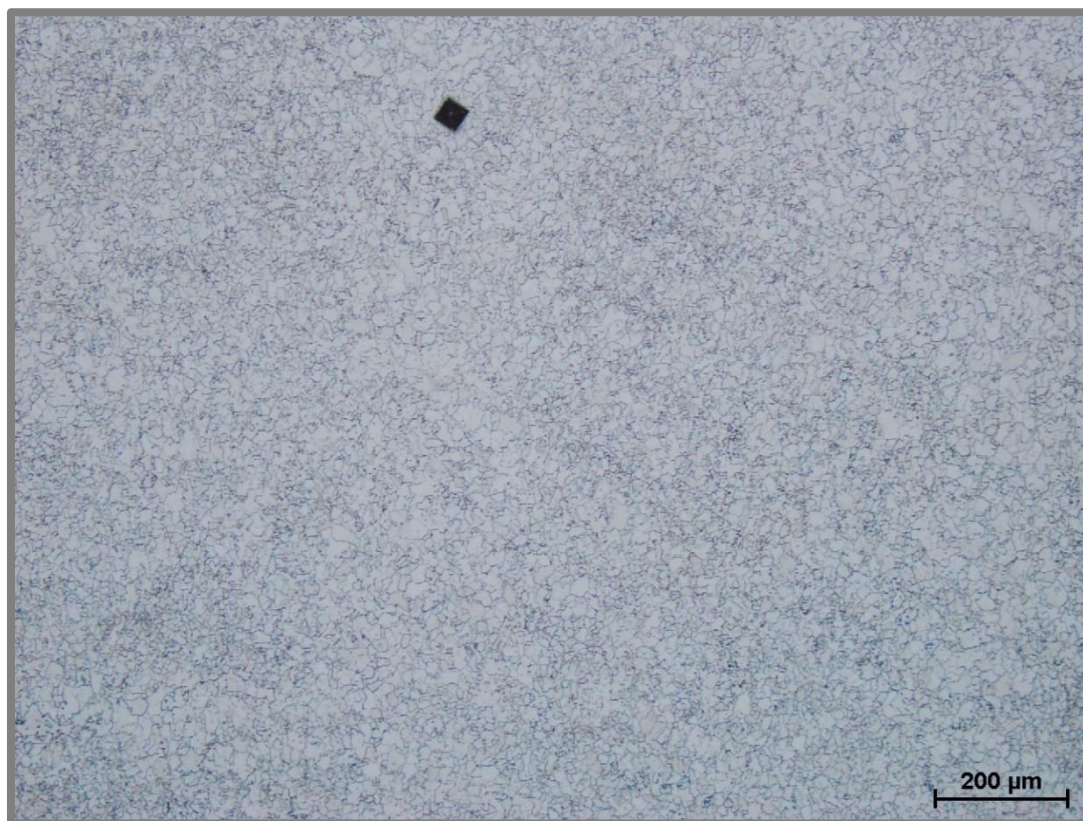


Obr. 5-27 B-H křivka vzorku v nežíhaném stavu

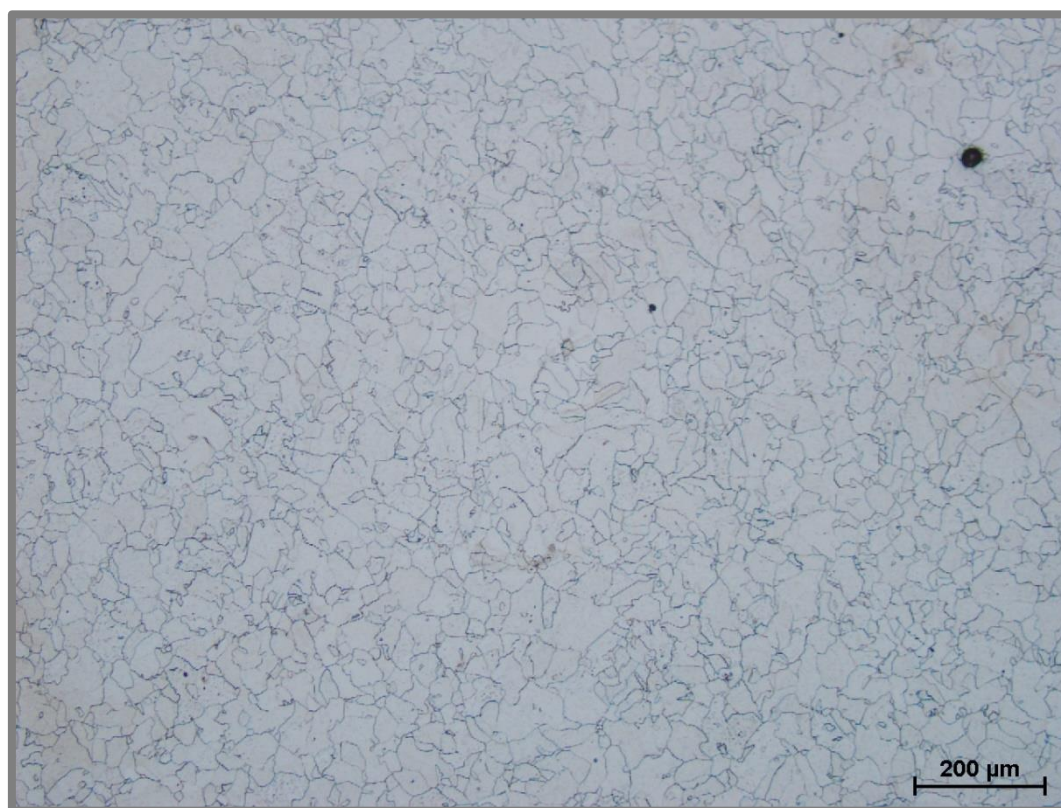


Obr. 5-28 B-H křivka v žíhaném stavu

U vzorku tepelně zpracovaného dochází k rychlejšímu nárůstu magnetické indukce, spojeného s poklesem remanence a koercivity, což je pro elektromagnetické aplikace žádoucí. Vzorky byly následně rozříznuty, vybroušeny a naleptány. Tím došlo k odhalení mikrostruktury, která je vyobrazena na dalších snímcích.



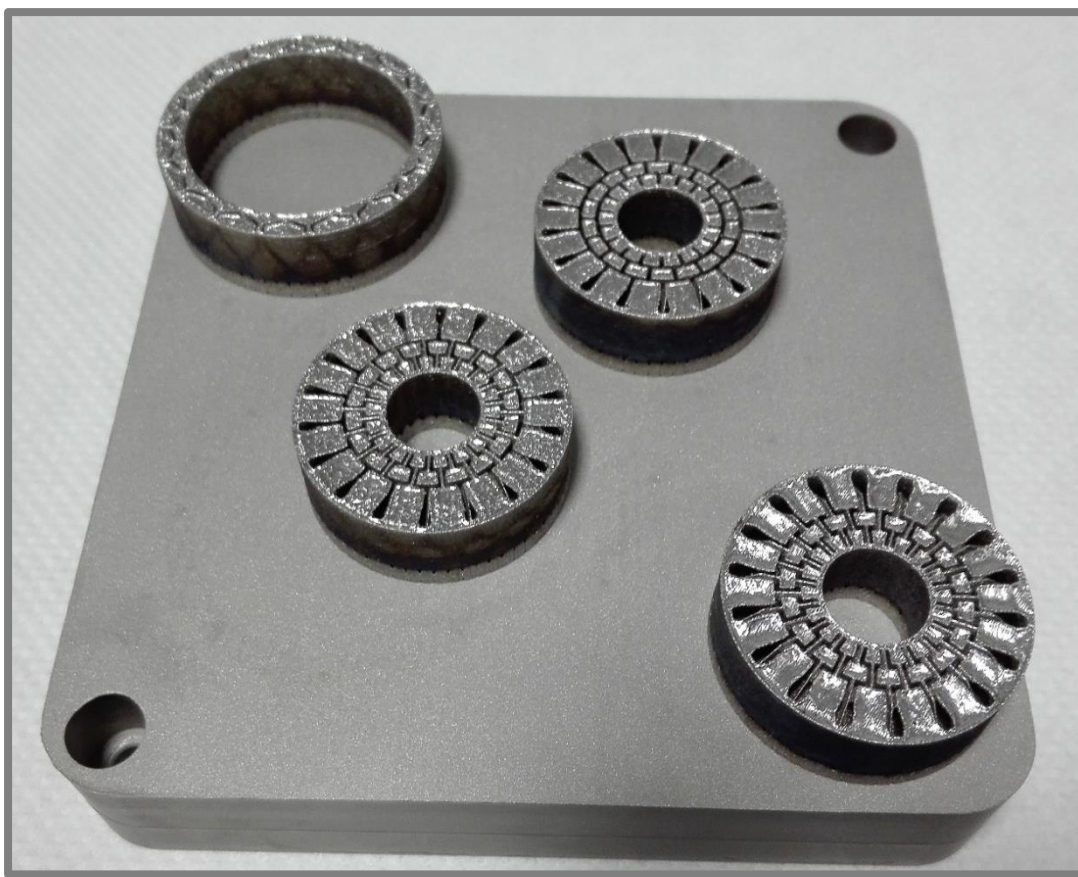
Obr. 5-29 Mikrostruktura tepelně nezpracovaného vzorku



Obr. 5-30 Mikrostruktura tepelně zpracovaného vzorku

Na obr. 5-29 je patrná jemnozrná struktura typická pro SLM díly. Po tepelném zpracování došlo ke zhrubnutí zrna dle očekávání. U vzorků byla také provedena zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse, kdy vzorek s menší velikostí zrna dosáhl tvrdosti 135 HV 0,3 a po žíhání 114 HV 0,3. Hodnoty tvrdosti lze podle převodních tabulek dle normy ISO 18265 [27] přepočítat na mez pevnosti materiálu, která činí v prvním případě 430 MPa, v druhém případě 370 MPa.

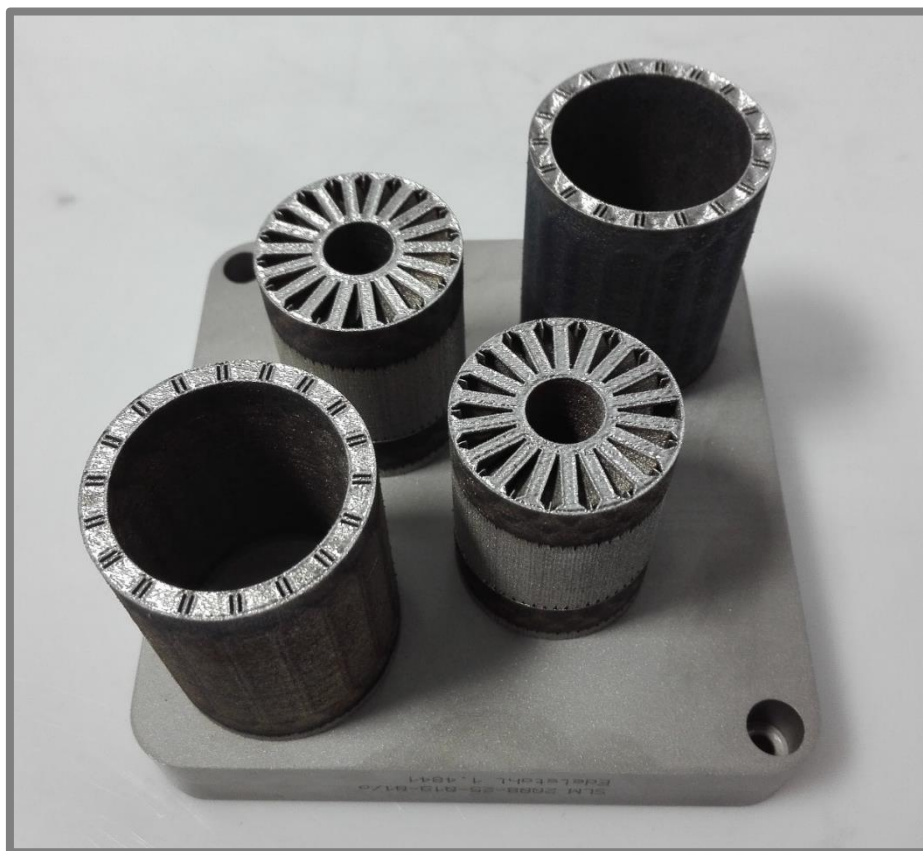
Pro výrobu čtvrtinových a dále celých modelů jader a plášťů magnetoreologického tlumiče byly použity nově vyvinuté procesní parametry. Bohužel vzhledem k časové náročnosti byl tisk proveden ještě před testem šikmých stěn, proto zde nebyly použity speciální procesní parametry vedoucí ke zlepšení povrchu spodních povrchů. I tak se všechny tři typy geometrie jader čtvrtinových modelů vytiskly bez viditelných defektů.



Obr. 5-31 Čtvrtinové modely tří různých geometrií jader tlumičů včetně pláště

Vzorky jader byly následně zality do zalévací hmoty pro ověření průchodnosti vnitřní struktury. Výsledná geometrie pro tisk celých jader byla vybrána ta, která obsahovala nejmenší množství tenkých stěn, aby nedošlo k jejich deformaci jako při výrobě strukturovaného toroidu.

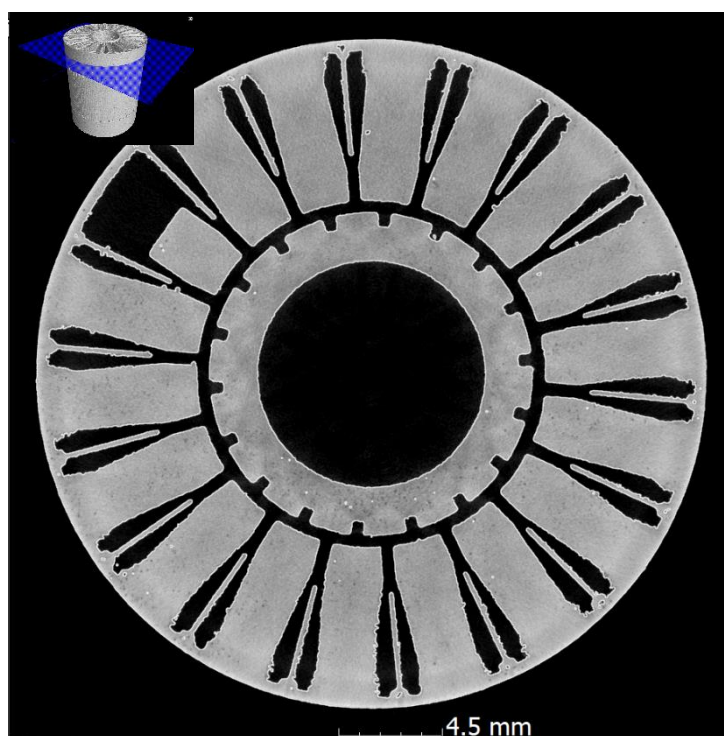
Stavba jednoho páru jader a dvojice plášťů magnetoreologického tlumiče trvala okolo 14 hodin, na což má hlavní vliv nízká rychlost skenování objemových částí. Vzhledem k minimálním požadavkům na mechanické vlastnosti jader magnetoreologického tlumiče a jejich plášťů u nich bylo aplikováno dříve testované tepelné zpracování. První pár jádra a pláště byl ponechán pro testování magnetických vlastností. Druhé jádro prošlo CT analýzou, díky které byla získaná reverzní data (s voxelovým rozlišením $1125 \times 1415 \times 1703$) vhodná k porovnání s originálním CAD modelem v programu GOM Inspect.



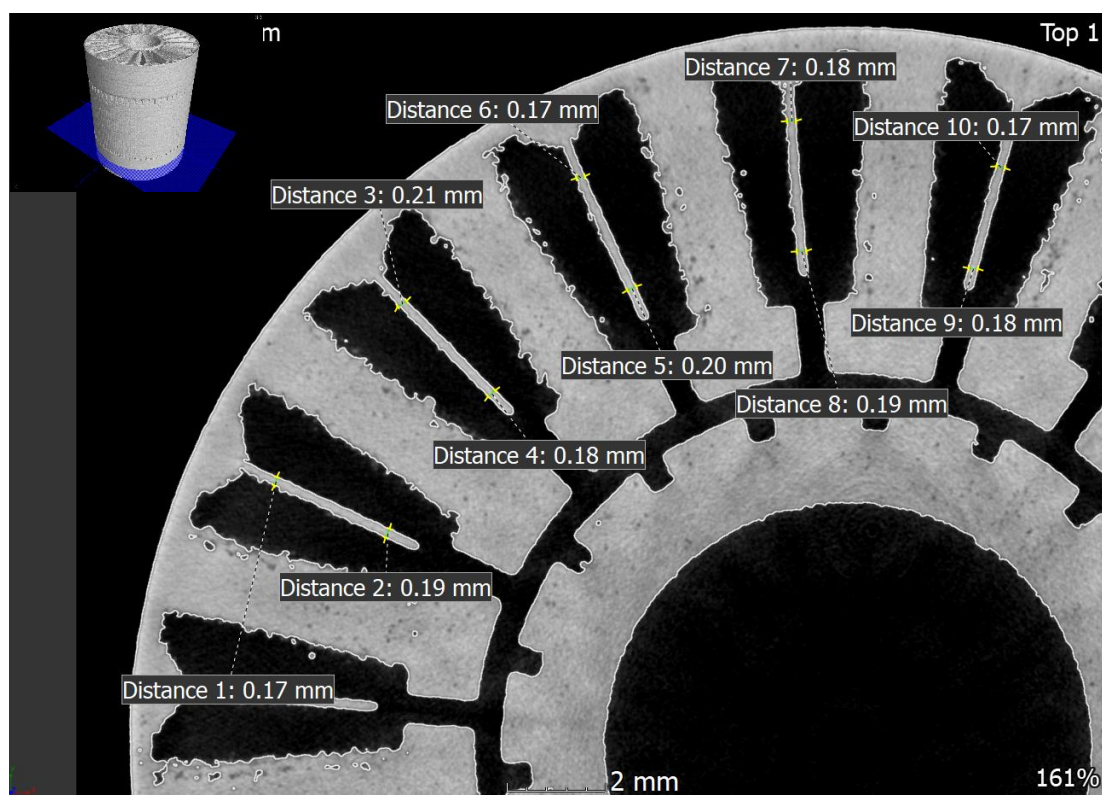
Obr. 5-32 Vyrobená jádra magnetoreologického tlumiče včetně plášťů

V příloze D se nachází výsledky srovnávací analýzy. Rozměrová odchylka dat se pohybuje převážně kolem $\pm 0,4$ mm. Lokálně jsou pak zaznamenány deviace větších, či menších hodnot, což může být důsledkem krom nepřesností vyrobeného jádra také chybou v STL souboru získaného z CT analýzy a jeho úpravou v programu GOM Inspect (vyhlazování ploch, uzavření děr).

Dále byla provedena analýza v programu myVGL, kde je možné zobrazit jednotlivé snímky CT dat a na nich provést měření velikosti prvků jádra v řezech. Naměřené hodnoty byly porovnány s originálním CAD modelem. Z obr. 5-33 je patrné, že jádro bylo vyrobeno s nízkým obsahem porozity objemových prvků. Na dalším obrázku je zakótována tloušťka kolmých tenkostěnných prvků. Průměrná hodnota naměřené tloušťky je $184\ \mu\text{m}$. Tloušťka stěny dána CAD modelem je $200\ \mu\text{m}$. Odchylka hodnot činí pouhých $16\ \mu\text{m}$, což je velice dobrý výsledek. V příloze E se nachází další snímek, na kterém jsou provedena měření rozměru objemového prvku. Zde činí odchylka od navržené geometrie $70\ \mu\text{m}$ do mínusu. Z analýzy vyplývá, že při výrobě dochází k mírnému smrštění dílu, přesto jsou deviace rozměrů téměř zanedbatelné.



Obr. 5-33 Snímek jádra vytvořený pomocí CT



Obr. 5-34 Snímek jádra s vynesnými kótami tenkostěnných prvků

5.11 Tahová zkouška

V příloze F se nachází protokol z tahové zkoušky, která potvrdila předpoklad zhoršení mechanických vlastností vlivem tepelného zpracování. Hodnoty základních tahových veličin jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5-14 Hodnoty základních tahových veličin (červeně vyznačené tepelně zpracované vzorky)

ID	E [GPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
1	194,1	441	397	453	23,8
2	196,7	434	395	449	24,3
3	205,6	444	401	453	20,3
4	205,1	329	250	352	34,0
5	184,8	294	258	355	33,9
6	209,1	323	254	353	35,2

U vyžíhaných vzorků byly naměřeny nižší hodnoty mezí kluzu a meze pevnosti, zvětšila se však jejich tažnost, což bylo možné předpovídat na základě poklesu tvrdosti.

6 DISKUZE

Analýzou distribuce prášku byl zjištěn rozdíl u 90% kumulativního zastoupení částic mezi naměřenými hodnotami na zařízení Horiba a udávanými výrobcem. Odchylna hodnot činila 5 μm a 11 μm v porovnání s hodnotami naměřenými Palouškem [9]. Jedná se o jednu z předpokládaných příčin výskytu množství defektů u objemových vzorků v prvním experimentu.

V první fázi byly provedeny testy spojené s vývojem procesních parametrů tenkostěnných vzorků stavěných kolmo a pod úhlem. U kolmých TS vzorků tvořených jedním návarem byly specifikovány procesní parametry vedoucí k výrobě stěny o tloušťce 156 μm a drsnosti povrchu $R_a = 12,2 \mu\text{m}$. Tyto parametry jsou definovány výkonem laseru 100 W, rychlostí skenování 300 mm/s a tloušťkou vrstvy 50 μm . Na základě statistického testu byla zjištěna tloušťka stěny tvořené dvojím skenováním laseru 205 μm s drsností povrchu 13 μm a stanoveny tak ideální procesní parametry pro výrobu tenkostěnných prvků. Těmito parametry jsou výkon laseru 100 W, rychlost skenování 400 mm/s a tloušťka vrstvy 50 μm . Statistický test také pomohl určit nejmenší tisknutelnou mezeru mezi těmito stěnami 210 μm . Dále bylo zjištěno, že úhel natočení tenkostěnného vzorku v horizontální rovině nemá vliv na jeho tloušťku. Následující experimenty TS vzorků stavěných pod úhlem 45° odhalily vliv použití speciálních procesních parametrů pro spodní povrch na jeho kvalitu. Bylo dosaženo snížení drsnosti povrchu R_a z 36 μm na 12 μm v případě spodní strany stěn na úkor nárůstu tloušťky lamely na 236 μm při použití výkonu laseru 100 W a rychlosti skenování 200 mm/s.

Výsledkem experimentů objemových vzorků jsou dva typy procesních parametrů. První z nich kombinuje výkon laseru 200 W, rychlost skenování 300 mm/s a vzdálenost šraf 117 μm . Takto vyrobený vzorek dosáhl relativní hustoty 99,82 % a drsnosti povrchu $R_a = 12 \mu\text{m}$. Tato kombinace ovšem není vhodná pro tisk velkoobjemových dílů, z hlediska rychlosti stavby. Proto byly v rámci dalších testů vyvinuty procesní parametry, které vedou ke zkrácení doby tisku o 45 %. Nastavením výkonu laseru na 300 W, rychlosti skenování 450 mm/s a šrafovací vzdálenosti 140 μm byla dosažena relativní hustota 99,9 %. Snížení doby tisku se projevilo nárůstem drsnosti povrchu na hodnotu 31,5 μm .

Byla vyrobena sada vzorků pro testování magnetických vlastností, na kterých byly postupně testovány nově vyvíjené procesní parametry. Byly potvrzeny hypotézy zlepšení magnetických vlastností užitím strukturované geometrie místo plného materiálu a také díky tepelnému zpracování, které mělo mimo jiné za následek pokles tvrdosti materiálu zhruba o 15 %. Vzhledem k nízkým požadavkům na mechanické vlastnosti byla vyrobena jádra magnetoreologických tlumičů spolu s pláští po výrobě taktéž vyžíhána. Výroba finálních dílů probíhala za použití pomalejších procesních parametrů. Bohužel nebylo z časových důvodů možné aplikovat speciální procesní parametry pro dolní povrchy tištěné geometrie vyvinuté při testu šikmých stěn. Přesto bylo dosaženo požadované přesnosti tisku. Jako důkaz bylo provedeno srovnání dat obdržených z CT analýzy s CAD modelem jádra v programu GOM Inspect, která poskytla celkový náhled na rozměrové odchylky mezi fyzickým modelem a navrženou geometrií. Analýza CT snímků v programu myVGL prokázala vhodnost zvolených parametrů na základě nízkého výskytu pórů a porovnání rozměrů.

V posledním kroku byla vyrobena tělíska pro tahovou zkoušku s využitím pomalejších procesních parametrů. Bylo dosaženo meze pevnosti 452 MPa v nevyžíhaném stavu, což je hodnota srovnatelná s literaturou [9]. Po tepelném zpra-

cování klesla mez pevnosti zhruba o 100 MPa, stejně tak meze kluzu. Naopak tažnost vzrostla o 10 %.

7 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo objasnit vliv procesních parametrů na rozměrovou přesnost a mechanické vlastnosti tenkostěnných struktur z čistého železa se zaměřením na elektromagnetické aplikace. Hlavní cíl byl splněn spolu se všemi dílčími.

Na základě této práce lze na zařízení SLM 280^{HL} vyrábět díly kombinující objemové a tenkostěnné prvky z prášku FeAM od firmy RioTinto s relativní hustotou 99,82 % a minimální tloušťkou stěny 205 μm . Vyvinuté procesní parametry jsou následující:

- Hraniční návary:
 - Výkon laseru = 100 W
 - Rychlost skenování = 400 mm/s
- Výplň:
 - Výkon laseru = 200 W
 - Rychlost skenování = 300 mm/s
 - Vzdálenost šraf = 117 μm
 - Tloušťka vrstvy = 50 μm

Takto vyrobené díly lze použít bez nebo s tepelným zpracováním. Při aplikaci žhání bez ochranné atmosféry za teploty 950 °C po dobu 4 hodin s následným pozvolným chladnutím v peci lze očekávat snížení tvrdosti z původních 135 na 114 HV, meze pevnosti ze 450 na 350 MPa a snížení mezí kluzu zhruba o 100 MPa. Výhodou je ovšem pokles remanence a koercivity vedoucí k rychlejšímu dosažení magnetického nasycení dílu. Použití tepelného zpracování je tedy nutno zvážit na základě účelu vyráběné součásti. Také je doporučeno použití speciálních procesních parametrů pro spodní plochy vedoucích ke snížení drsnosti o 67 %, kterými je výkon laseru 100 W a rychlost skenování 200 mm/s.

Pro tisk rozměrnějších dílů tvořených převážně objemovými prvky větších rozměrů je vhodné použití výkonu laseru 300 W, rychlosti skenování 450 mm/s a vzdálenosti šraf 140 μm . U objemového vzorku vyrobeného těmito parametry bylo dosaženo relativní hustoty 99,9 %. Je nutné ovšem počítat s nárůstem drsnosti povrchu na hodnotu 31,5 μm .

V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné provést CT analýzu objemových vzorků tištěných oběma typy procesních parametrů a ověřit tak jejich relativní hustotu. V tomto výzkumu sice byla provedena CT analýza dílu kombinujícího tenkostěnné a objemové prvky, avšak pro podrobnější vyhodnocení porozity byl vzorek moc velký vzhledem k použitému voxelovému rozlišení. Relativní hustota byla tedy zhodnocena pouze vizuálně. Dalším možným postupem je otestování metody obalu a jádra a spojit tak dva typy procesních parametrů do jednoho materiálového souboru. Zatím co jádro dílu by bylo tištěno rychlejšími procesními parametry, které by vedly k dosažení menší porozity, na obal by bylo použito pomalejší nastavení, které by zajistilo geometrickou přesnost a dostatečnou kvalitu povrchu. Bylo by nutné experimentálně zjistit, v jaké vzdálenosti od povrchu je optimální nastavit hranici obou procesních parametrů, aby tím nebyla drsnost povrchu ovlivněna, ale zároveň se co nejvíce zkrátil výrobní čas.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLIMEK, Lubomír, Tomáš STRMISKA, Daniel SKULINA a Jan SUCHÝ. *Návrh a výroba děleného magnetického jádra MR obvodu pomocí SLM technologie*. Brno, 2016. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí semestrální práce Jakub Roupec.
- [2] ABOULKHAIT, Nesma T, Nicola M EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014, roč. 1, s. 77-86. ISSN 22148604
- [3] KOPELIOVICH, Dimitri. Powder preparation. *SubsTech*. 2012. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation
- [4] GLARDONL, R, N KARAPATISL a V ROMANOZ. Influence of Nd : YAG Parameters on the Selective Laser Sintering of Metallic Powders. *Manufacturing Technology Journal*. 2001, roč. 50, č. 1, s. 133–136. ISSN 00078506 (ISSN).
- [5] YADROITSEV, I., A. GUSAROV, I. YADROITSAVA a I. SMUROV. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, roč. 210, č. 12, s. 1624–1631. ISSN 09240136.
- [6] SPIERINGS, a.B., M. SCHNEIDER a R. EGGENBERGER. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2011, roč. 17, č. 5, s. 380–386. ISSN 1355-2546.
- [7] ZIOŁKOWSKI, G., E. CHLEBUS, P. SZYMCHYK a J. KURZAC. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014, roč. 14, č. 4, s. 608–614. ISSN 16449665.
- [8] SONG, Bo, Shujuan DONG, Sihao DENG, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*. 2014, roč. 56, č. March, s. 451–460. ISSN 00303992.
- [9] PALOUSEK, David, Libor PANTELEJEV, Tomas ZIKMUND a Daniel KOUTNY. Processing of nearly pure iron using 400w selective laser melting – initial study. *MM Science Journal*. 2017, s. 1738–1743.
- [10] SIMCHI, A. a H. POHL. Direct laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Materials Science and Engineering A*. 2004, roč. 383, č. 2, s. 191–200. ISSN 09215093.
- [11] MURALI, K., A. N. CHATTERJEE, P. SAHA, R. PALAI, S. KUMAR, S. K. ROY, P. K. MISHRA a A. ROY CHOUDHURY. Direct selective laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, roč. 136, č. 1–3, s. 179–185. ISSN 09240136.
- [12] SONG, Bo, Shujuan DONG, Qi LIU, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior. *Materials and Design*. 2014, roč. 54, č. February, s. 727–733. ISSN 18734197.
- [13] AKITA, Masayuki, Yoshihiko UEMATSU, Toshifumi KAKIUCHI, Masaki NAKAJIMA a Ryosei KAWAGUCHI. Defect-dominated fatigue behavior in type 630 stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*. 2016, roč. 666, s. 19–26. ISSN 09215093.

- [14] KRUTH, Jean-Pierre, Evren YASA a Jan DECKERS. Roughness improvement in selective laser melting. *Proceedings of the 3rd International Conference on Polymers and Moulds Innovations*. 2008, s. 170–183.
- [15] MUMTAZ, K. A. a N. HOPKINSON. Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, roč. 210, č. 2, s. 279–287. ISSN 09240136.
- [16] GEBHARDT, Andreas, Jan-Steffen HÖTTER a Dawid ZIEBURA. Impact of SLM build parameters on the surface quality. *RTejournal - Forum für Rapid Technologie*. 2014. Dostupné z: <http://www.rtejournal.de/ausgabe11/3852>
- [17] YADROITSEV, I, Ph BERTRAND a I SMUROV. Parametric analysis of the selective laser melting process. 2007, roč. 253, s. 8064–8069.
- [18] ZHANG, Baicheng, Nour Eddine FENINECHE, Lin ZHU, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Studies of magnetic properties of permalloy (Fe30%Ni) prepared by SLM technology. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012, roč. 324, č. 4, s. 495–500. ISSN 03048853.
- [19] ZHANG, Baicheng, Nour Eddine FENINECHE, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and magnetic properties of Fe-Ni alloy fabricated by selective laser melting Fe/Ni mixed powders. *Journal of Materials Science and Technology*. 2013, roč. 29, č. 8, s. 757–760. ISSN 10050302.
- [20] BAUER, T, A B SPIERINGS a K WEGENER. Microstructure and Electro-Magnetic Properties of a Nickel-Based Anti-Magnetic Shielding Alloy. 2016, s. 1856–1867.
- [21] KRUTH, J, M BADROSSAMAY, E YASA, J DECKERS, L THIJS a J Van HUMBEECK. Part and material properties in selective laser melting of metals. *16th International Symposium on Electromachining*. 2010, s. 1–12.
- [22] VYAZNIKOV, N.F. a G.I. IVANYUK. Annealing of magnetically soft iron. *Metal Science and Heat Treatment*. 1959, s. 39–41.
- [23] FERRARA, Enzo, Elena OLIVETTI, Fausto FIORILLO, Eric FORTON, Luca MARTINO a Luciano ROCCHINO. Microstructure and magnetic properties of pure iron for cyclotron electromagnets. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, roč. 615, s. S291–S295. ISSN 09258388.
- [24] MA, Jidong, Mingli QIN, Xiaofeng ZHANG, Lin ZHANG, Xuanhui QU a Lusha TIAN. Microstructure and magnetic properties of high density P/M pure iron. *Materials Research Bulletin*. 2015, roč. 64, s. 123–127. ISSN 00255408.
- [25] VÍTEK, P. *Návrh pístní skupiny rychlého magnetoreologického tlumiče s využitím technologie selective laser melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..
- [26] DIN-50125-2004. *Scribd - Read books, audiobooks, and more* [online]. Copyright © 2018 Scribd Inc. [cit. 15.05.2018]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/259280013/DIN-50125-2004>
- [27] ISO 18265. *Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti*. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2003

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SLM		Selective laser melting
CAD		Computer aided design
3D		trojrozměrný
STL		Stereolitography
TS		tenkostěnné
CT		Computed tomography
YLR		Ytterbium laser
SLS		Selective laser sintering
YAG		Yttrium aluminium garnet
SLE		Selective laser eroding
SLR		Selective laser remelting
Ra	μm	Drsnost povrchu v řezu
R _{eL}	MPa	Dolní mez kluzu
R _{eH}	MPa	Horní mez kluzu
R _m	MPa	Mez pevnosti
E	GPa	Youngův modul pružnosti
A	%	Tažnost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Jádra magnetoreologických tlumičů vyrobených pomocí SLM [1]	13
Obr. 2-1 Rozdělení procesních parametrů SLM [2]	14
Obr. 2-2 Schéma výroby prášku pomocí atomizace [3]	15
Obr. 2-3 Procesní mapa „single“ návarů [5]	16
Obr. 2-4 Archimedova metoda stanovení relativní hustoty [6]	16
Obr. 2-5 Procesní mapa čistého železa [8]	17
Obr. 2-6 Výsledky tahové zkoušky [8]	18
Obr. 2-7 Výsledky granulometrie [9]	18
Obr. 2-8 Metalografický snímek s hodnotami tvrdosti [10]	19
Obr. 2-9 Procesní parametry [11]	20
Obr. 2-10 Strategie skenování [11]	20
Obr. 2-11 Vyznačené oblasti zkoumání tvrdosti [11]	21
Obr. 2-12 Hodnoty naměřených tvrdostí [11]	21
Obr. 2-13 Tvrdost podle Vickerse před a po tepelné úpravě [12]	22
Obr. 2-14 Porovnání tvrdostí SLM vzorků a CM (konvenční metoda) vzorků [13] ..	22
Obr. 2-15 Výsledné hodnoty průměrné drsnosti povrchu pro jednotlivé operace [14]	23
Obr. 2-16 Tenkostěnný vzorek [15]	24
Obr. 2-17 Tvary pulsů a příslušné snímky návarů [15]	24
Obr. 2-18 Vytisknuté vzorky včetně značení jednotlivých ploch [16]	25
Obr. 2-19 Způsob stavby vzorků pod úhlem [16]	26
Obr. 2-20 Horní pohled tenkostěnných vzorků tištěných s různým úhlem natočení. Tloušťka modelu stěn je (a) 400 μm , (b) 200 μm , (c) 100 μm [17]	27
Obr. 2-21 Graf závislosti koercivity na rychlosti skenování pro různé hodnoty výkonu laseru [18]	28
Obr. 2-22 Vlevo vertikální a horizontální způsob stavby, vpravo způsob měření mag. vlastností [20]	29
Obr. 2-23 Porovnání dosažených hodnot mag. vlastností [20]	29
Obr. 2-24 Hysterezní smyčka při teplotě žhání 820 °C [23]	30
Obr. 2-25 Závislost maximální permeability a koercivity na teplotě sintrování [24] ..	30
Obr. 2-26 Závislost maximální permeability a koercivity na době sintrování [24] ..	31
Obr. 4-1 Schéma pracovního postupu	34
Obr. 4-2 Vzorky tvořené jedním návarem (vlevo), vzorky tvořené dvojitým skenováním laseru (vpravo)	35
Obr. 4-3 Geometrie tenkostěnného vzorku tvořeného jedním návarem	36
Obr. 4-4 Metoda měření tloušťky stěn	37
Obr. 4-5 Geometrie tenkostěnného vzorku tvořeného dvěma návary	37
Obr. 4-6 Hřebenovité a válcovité vzorky pro statistický test	38
Obr. 4-7 Rozmístění vzorků na platformě s označením procesních parametrů. Výkon laseru konstantní: 100 W, rychlost skenování: 1) 100 mm/s, 2) 200 mm/s, 3) 300 mm/s, 4) 400 mm/s	39
Obr. 4-8 Snímek výbrusu lamely válcovitého vzorku	39
Obr. 4-9 Orientace vzorku na platformě (ilustrativní)	40
Obr. 4-10 Řez modelu strukturovaného toroidu	42
Obr. 4-11 Výkres tahového tělíska podle normy [26]	43
Obr. 5-1 Graf distribuce částic kovového prášku	44
Obr. 5-2 Snímek částic prášku pořízený el. mikroskopem	45

Obr. 5-3 Snímek porézního vzorku	46
Obr. 5-4 Řez objemovým vzorkem	46
Obr. 5-5 Distribuce částic dle Palouška [9]	47
Obr. 5-6 Deformovaný tenkostěnný vzorek	48
Obr. 5-7 Metalografický výbrus tenkostěnného vzorku s kótami	48
Obr. 5-8 Mapa tloušťky stěn TS vzorků (modře) na velké platformě (rozměry v μm)	49
Obr. 5-9 Mapa tloušťky stěn vzorků na malé platformě (rozměry v μm)	50
Obr. 5-10 Snímky vzorků z horního pohledu před odstraněním z platformy	51
Obr. 5-11 Snímek vzorku v horním pohledu. Procesní parametry: výkon laseru = 400 W, rychlost skenování = 700 mm/s	52
Obr. 5-12 Snímek pořízený interferometrickým profilometrem vzorku s nejnižší hodnotou drsnosti povrchu	52
Obr. 5-13 Snímek vzorku s nejnižší hodnotou drsnosti povrchu	53
Obr. 5-14 Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru	53
Obr. 5-15 Graf závislosti tloušťky stěn na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony	54
Obr. 5-16 Nejvíce perspektivní TS vzorek tvořený jedním návarem	54
Obr. 5-17 Graf závislosti tloušťky stěny na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru	55
Obr. 5-18 Výbrus tenkých stěn tvořených dvěma návary	56
Obr. 5-19 Průměrné hodnoty tloušťky stěny v μm s variačním koeficientem v %	57
Obr. 5-20 Průměrné šířky nejužších dosažených mezer	58
Obr. 5-21 Výbrus hřebenového vzorku	59
Obr. 5-22 Schéma trasy laseru (šipky) s předchozí vypálenou vrstvou (čárkovaně)	61
Obr. 5-23 Snímky výbrusu vzorků se značnou porozitou včetně čísla vzorku	64
Obr. 5-24 Vystouplé hraniční návary horní vrstvy objemového vzorku	65
Obr. 5-25 Rozříznuté jádro pomocí drátové řezačky a náhled do vnitřní struktury	66
Obr. 5-26 Mezery mezi objemovými prvky jsou v jednom směru širší než v druhém	66
Obr. 5-27 B-H křivka vzorku v nežíhaném stavu	67
Obr. 5-28 B-H křivka v žíhaném stavu	68
Obr. 5-29 Mikrostruktura tepelně nezpracovaného vzorku	68
Obr. 5-30 Mikrostruktura tepelně zpracovaného vzorku	69
Obr. 5-31 Čtvrtinové modely tří různých geometrií jader tlumičů včetně pláště	70
Obr. 5-32 Vyrobená jádra magnetoreologického tlumiče včetně plášťů	71
Obr. 5-33 Snímek jádra vytvořený pomocí CT	72
Obr. 5-34 Snímek jádra s vynesnými kótami tenkostěnných prvků	72

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Závislost drsnosti povrchu Ra na úhlu mezi vzorkem a platformou (popis ploch podle obr. 2-18).....	25
Tab. 2-2 Závislost drsnosti povrchu Ra	25
Tab. 2-3 Závislost drsnosti povrchu Ra na místě měření (popis pozic podle obr. 2-18).....	26
Tab. 4-1 Fáze vývoje procesních parametrů tenkých stěn včetně počtu vyrobených vzorků	34
Tab. 4-2 Parametry zařízení SLM 280 ^{HL}	35
Tab. 5-1 Kumulativní zastoupení částic	44
Tab. 5-2 Chemické složení prášku	45
Tab. 5-3 Statistické údaje 1. a 2. testu tenkých stěn	50
Tab. 5-4 Hustota energie jednotlivých vzorků	51
Tab. 5-5 Tloušťka stěn vzorků tvořených jedním návarem	56
Tab. 5-6 Tloušťka stěn vzorků tvořených dvojím skenováním laseru	56
Tab. 5-8 Statistické hodnoty nejužších mezer, konstantní výkon laseru 100 W.....	59
Tab. 5-9 Porovnání tloušťky stěny vzorků stavěných kolmo a pod úhlem.....	60
Tab. 5-10 Porovnání drsnosti povrchu vzorků stavěných kolmo a pod úhlem.....	60
Tab. 5-11 Tloušťka šikmých stěn s upravenými procesními parametry	62
Tab. 5-12 Drsnost povrchu spodní strany vzorku	62
Tab. 5-13 Tabulka použitých procesních parametrů a dosažené porozity	63
Tab. 5-14 Přehled použitých procesních parametrů a dosažené porozity	65
Tab. 5-15 Hodnoty základních tahových veličin (červeně vyznačené tepelně zpracované vzorky).....	73

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Obr. A-1 Hysterezní smyčky a) $v = 0,1$ m/s, b) $v = 0,4$ m/s, c) $v = 1,6$ m/s

Příloha B: Obr. B-1 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 1
Obr. B-2 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 1
Obr. B-3 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 2
Obr. B-4 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 2
Obr. B-5 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 3
Obr. B-6 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 3
Obr. B-7 Čtvrtinový model pláště tlumiče
Obr. B-8 Řez čtvrtinovým modelem pláště jádra tlumiče
Obr. B-9 Řez jádrem tlumiče
Obr. B-10 Řez pláštěm jádra tlumiče

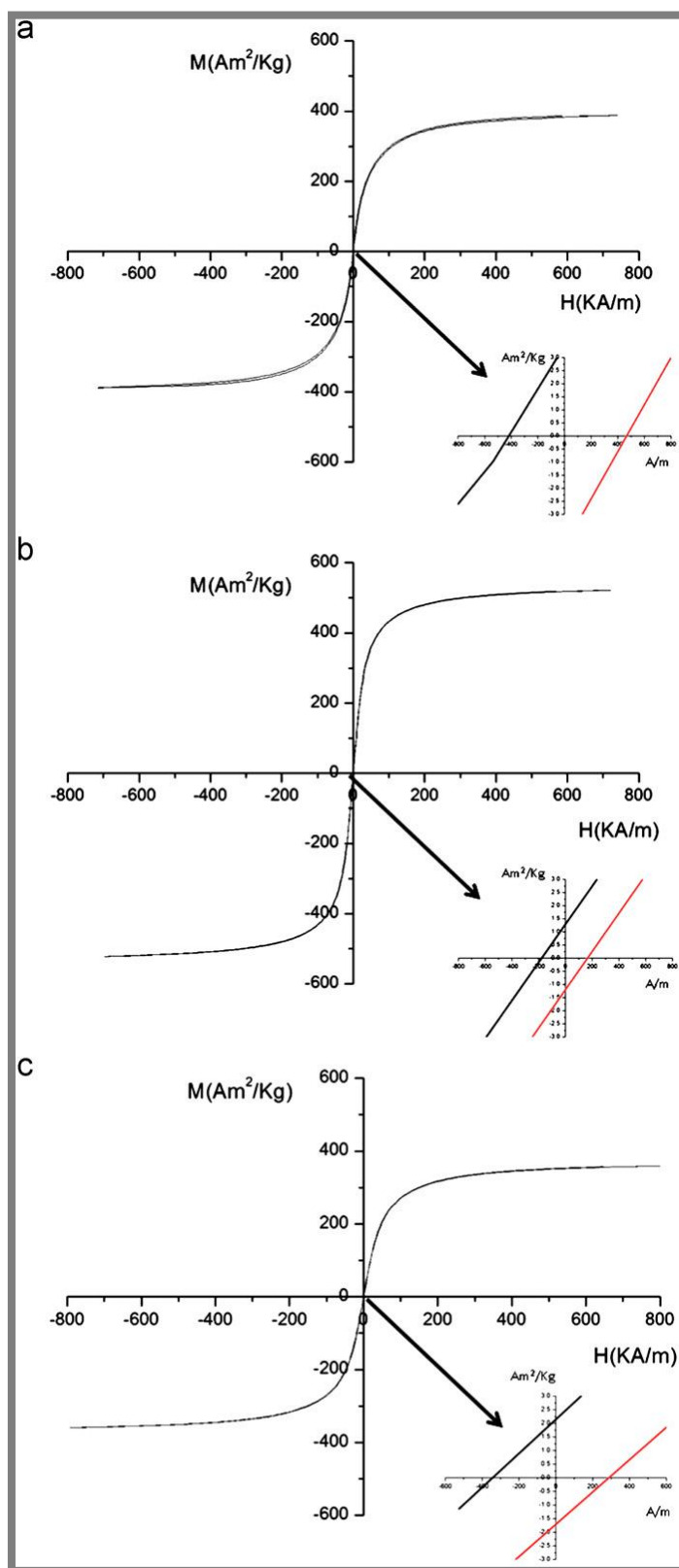
Příloha C: Obr. C-1 Protokol distribuce částic provedené na zařízení Horiba LA-950
Obr. C-2 Složení a distribuce částic dodané výrobcem prášku

Příloha D: Obr. D-1 Srovnání CT dat s CAD modelem
Obr. D-2 Srovnání CT dat s CAD modelem
Obr. D-3 Srovnání CT dat s CAD modelem

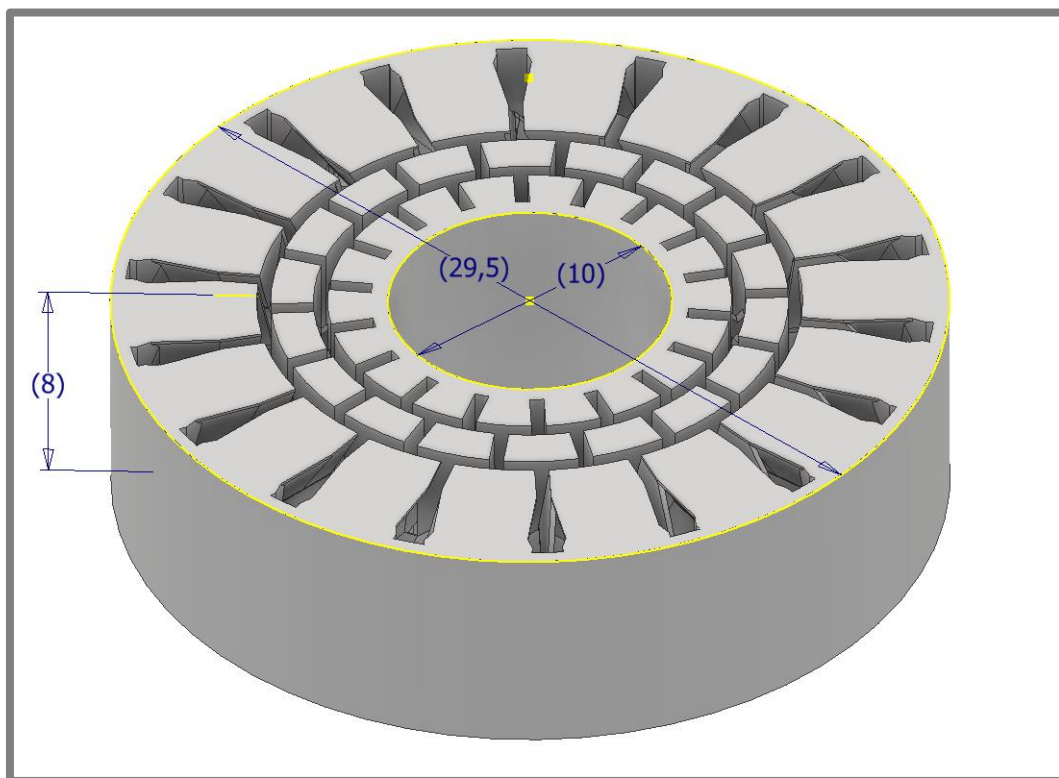
Příloha E: Obr. E-1 Měření rozměrů objemových prvků na snímcích z CT analýzy

Příloha F: Obr. F-1 Tahová zkouška vyžíhaných (FZ1-E-1-1-3) a nežíhaných (FZ1-E-2-1-3) vzorků

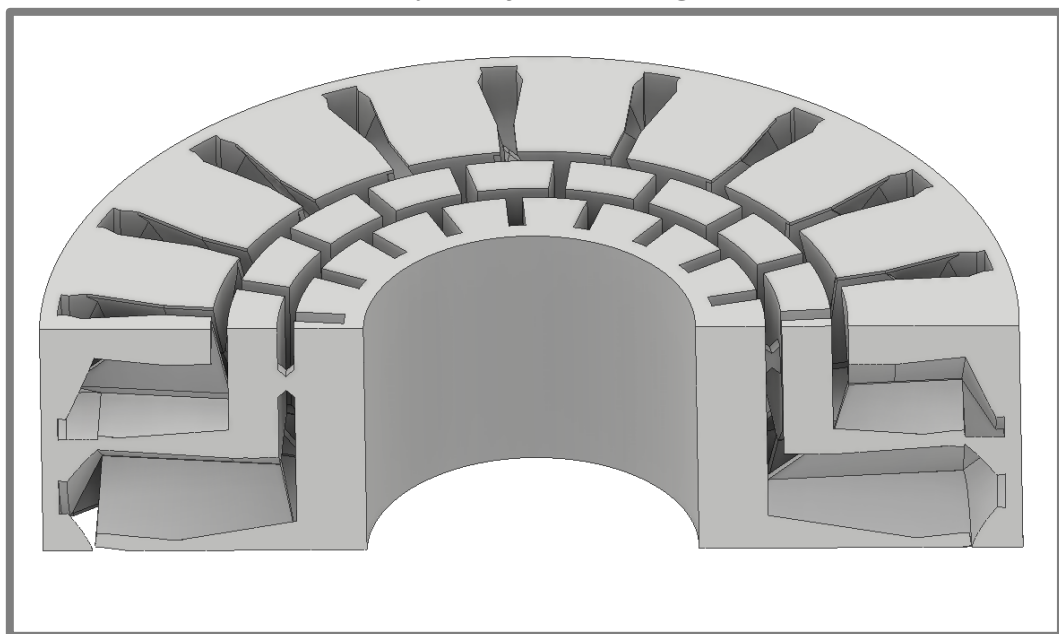
PŘÍLOHA A

Obr. A-1 Hysterezní smyčky a) $v = 0,1 \text{ m/s}$, b) $v = 0,4 \text{ m/s}$, c) $v = 1,6 \text{ m/s}$ [15]

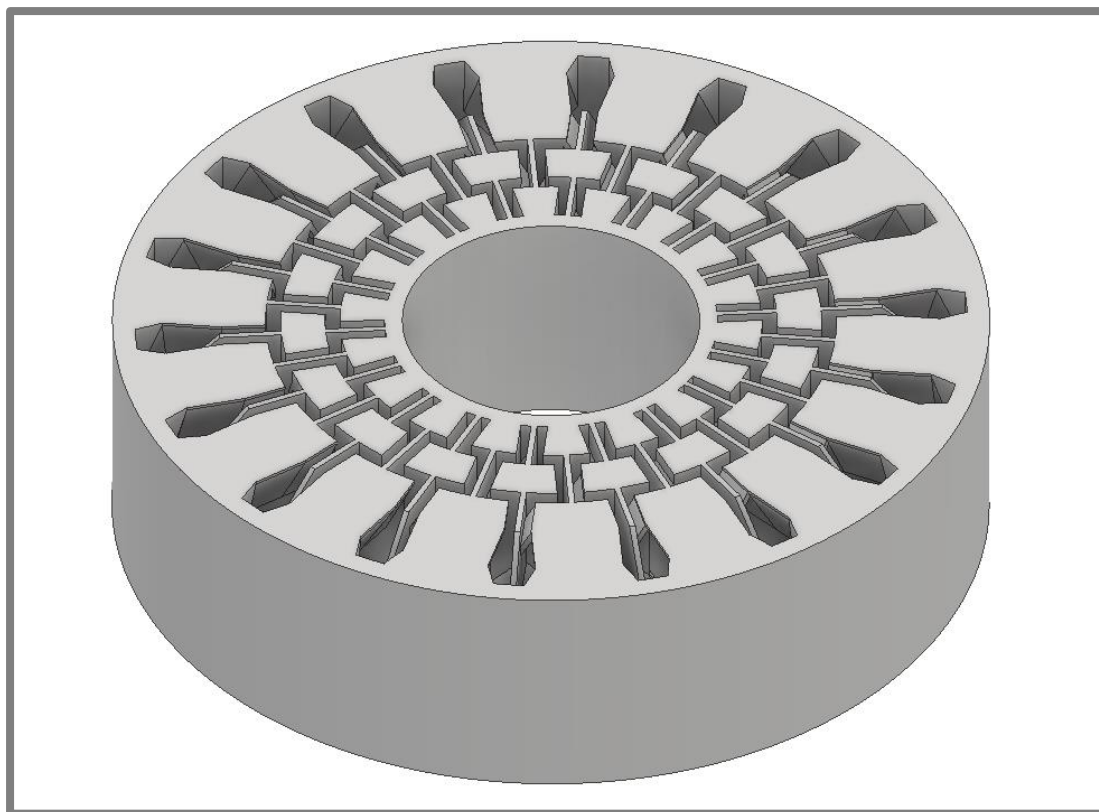
PŘÍLOHA B



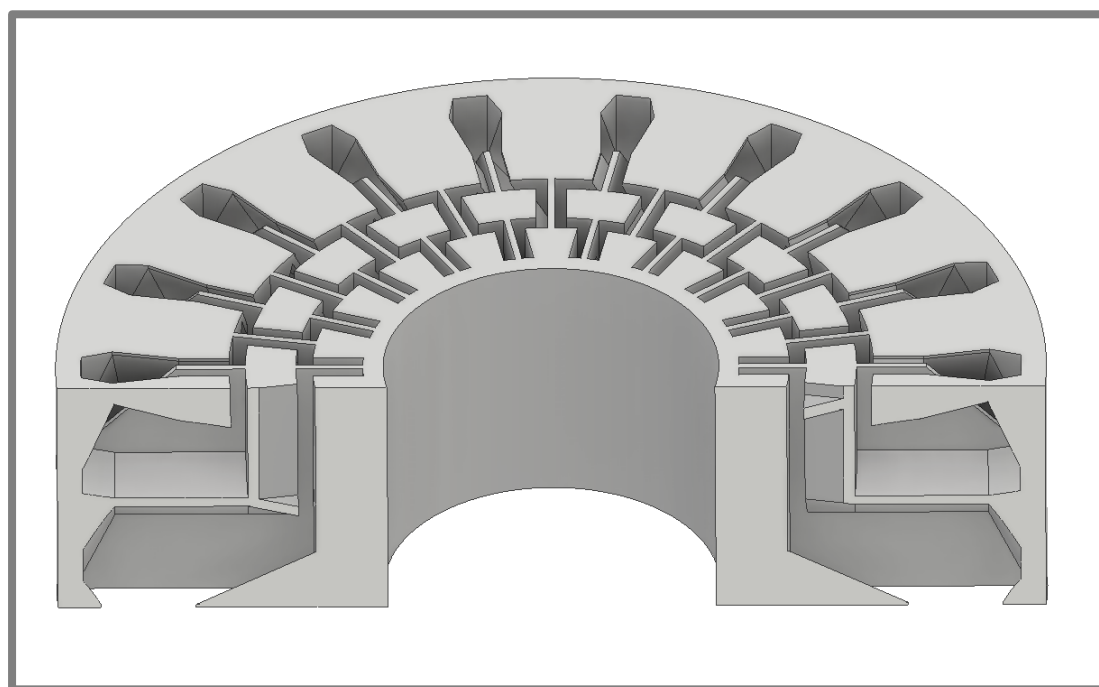
Obr. B-1 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 1



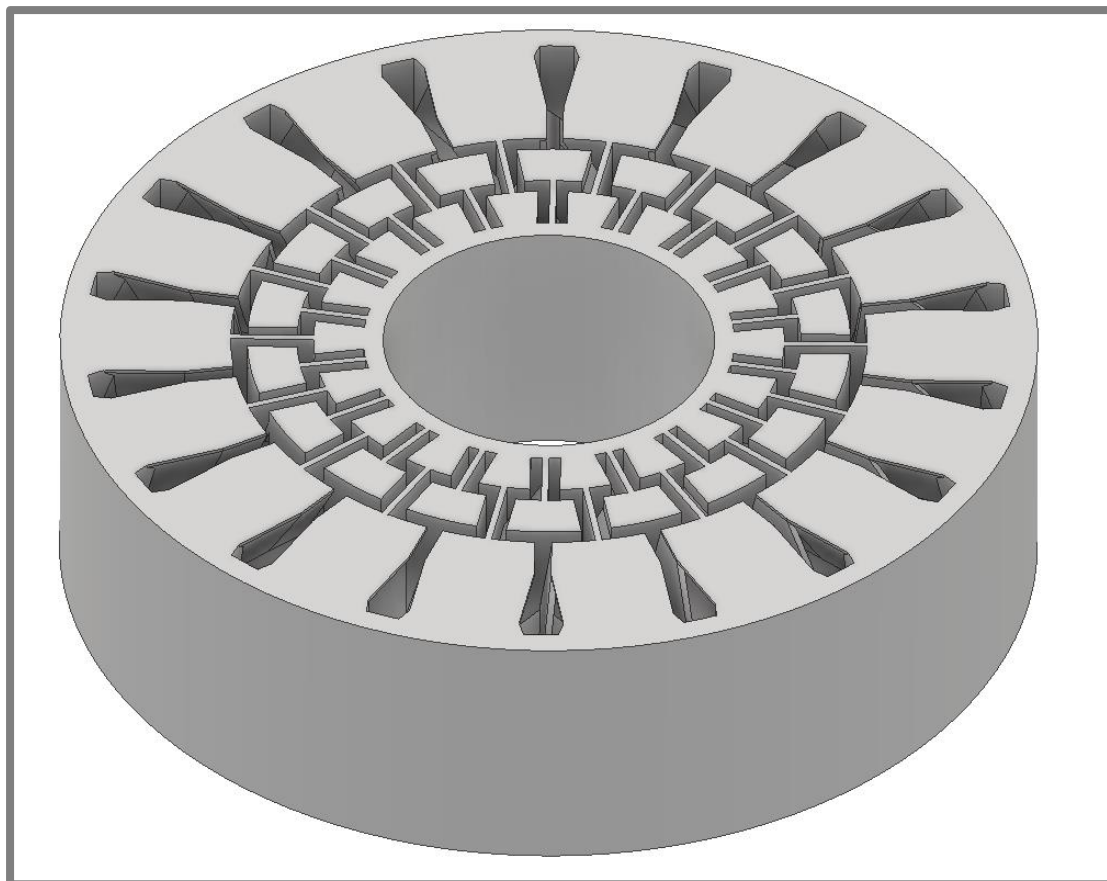
Obr. B-2 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 1



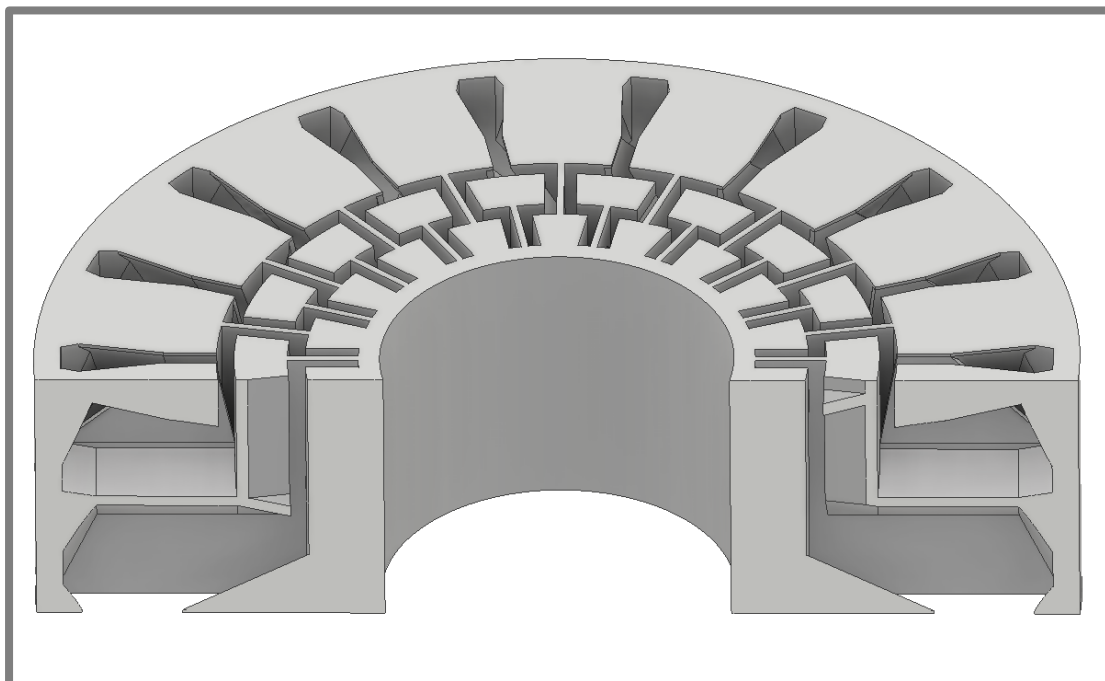
Obr. B-3 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 2



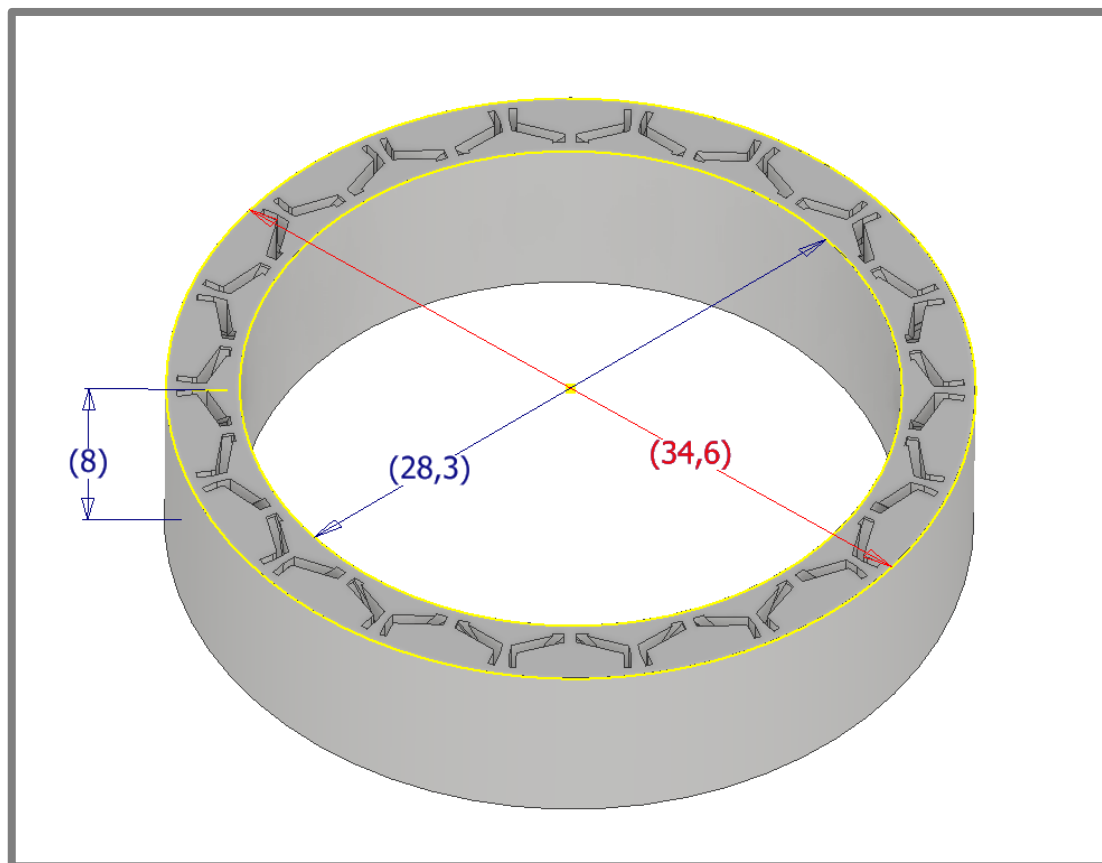
Obr. B-4 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 2



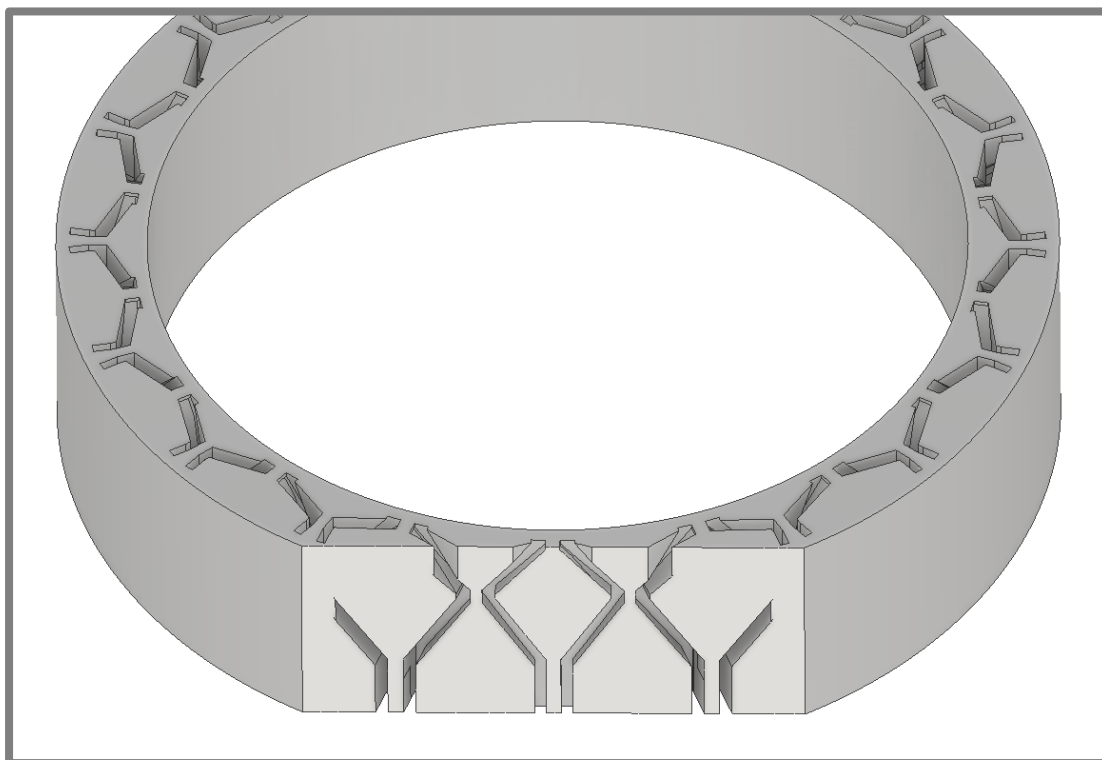
Obr. B-5 Čtvrtinový model jádra tlumiče – geometrie č. 3



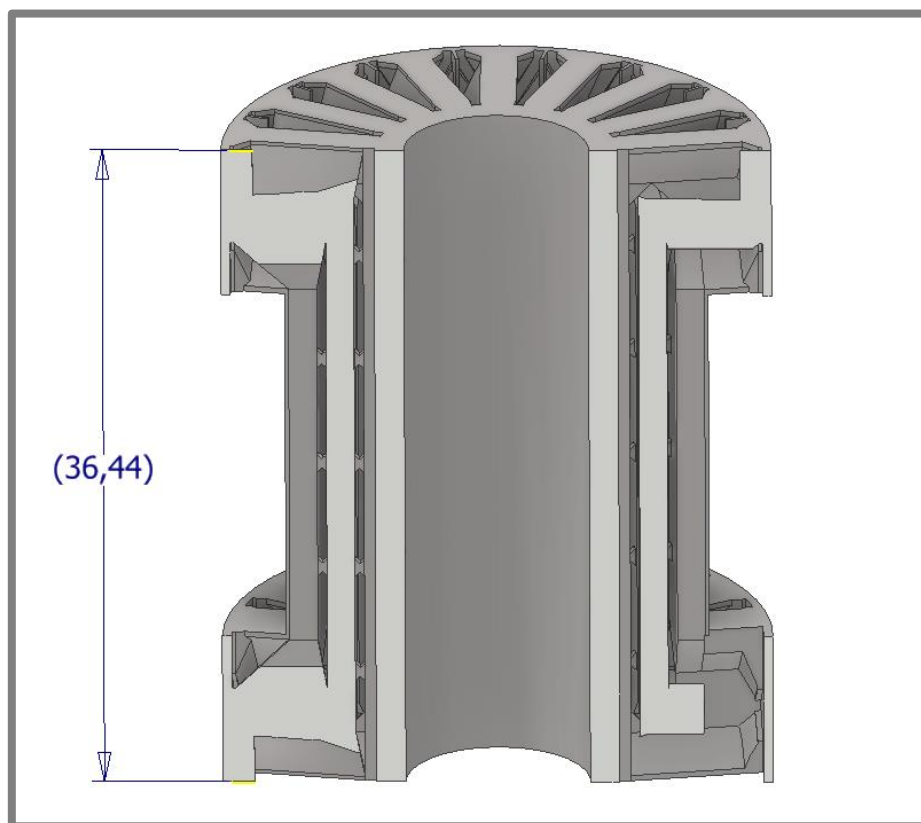
Obr. B-6 Řez čtvrtinovým modelem jádra tlumiče – geometrie č. 3



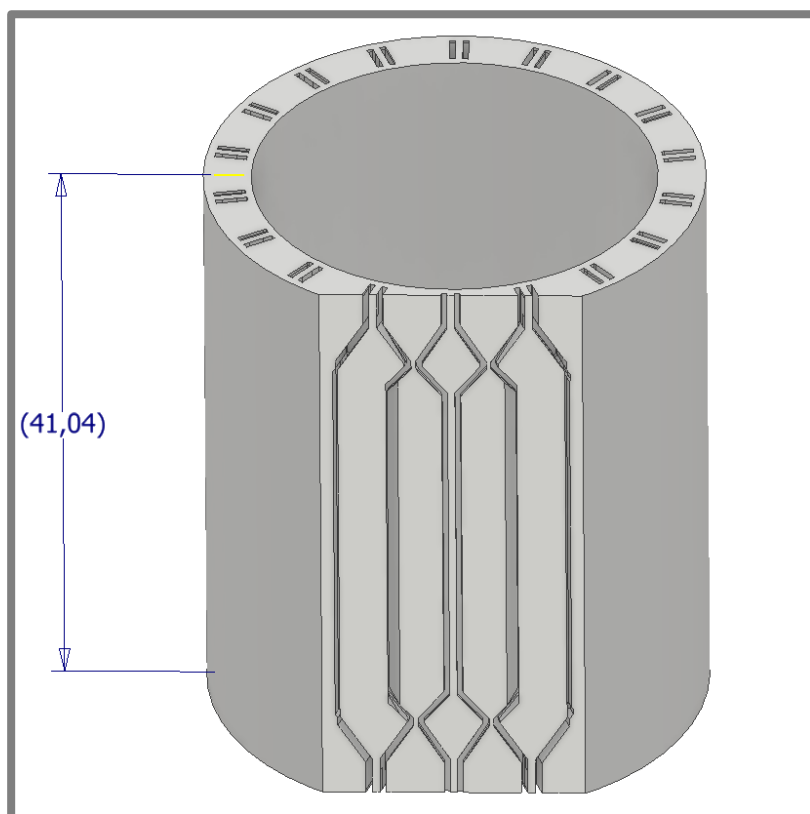
Obr. B-7 Čtvrtinový model pláště tlumiče



Obr. B-8 Řez čtvrtinovým modelem pláště jádra tlumiče



Obr. B-9 Řez jádrem tlumiče



Obr. B-10 Řez pláštěm jádra tlumiče

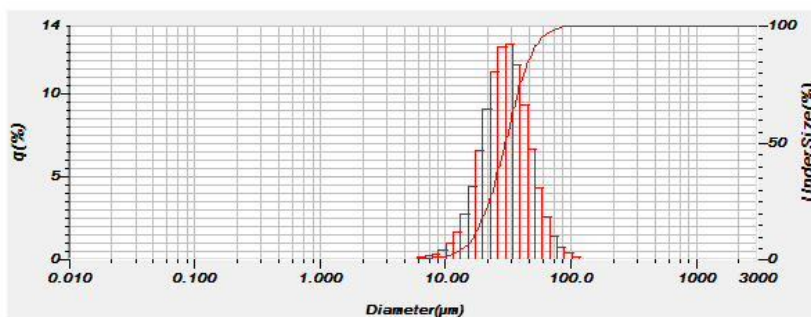
PŘÍLOHA C

2018.04.16 14:37:42

HORIBA

Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: ocel UFM Hynek	Median Size	: 29.80672(μm)
Data Name	: cisteFe nový prasek 3minUS	Mean Size	: 32.35117(μm)
Transmittance(R)	: 78.8(%)	Std.Dev.	: 14.3436(μm)
Transmittance(B)	: 80.9(%)	Geo.Mean Size	: 29.4317(μm)
Circulation Speed	: 4	Geo.Std.Dev.	: 1.5444(μm)
Agitation Speed	: 5	Mode Size	: 31.8344(μm)
Ultra Sonic	: 01:00 (7)	Span	: OFF
Form of Distribution	: Auto	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 16.9378(μm)
Distribution Base	: Volume		: (9)90.00 (%) - 50.7476(μm)
Refractive Index (R)	: Iron[Iron(3.500 - 3.800i),water(1.333)]		
Refractive Index (B)	: Iron[Iron(3.500 - 3.800i),water(1.333)]		
Material	: ocel - Cr		



No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)
1	0.011	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	63	51.471	6.576	90.685
2	0.013	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	64	58.963	4.235	94.920
3	0.015	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	65	67.523	2.904	97.823
4	0.017	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	66	77.339	1.378	99.201
5	0.020	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	67	88.583	0.699	99.900
6	0.022	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	68	101.460	0.337	99.937
7	0.026	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	69	116.210	0.163	100.000
8	0.029	0.000	0.000	39	1.951	0.000	0.000	70	133.103	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	71	152.453	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	72	174.616	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000				
12	0.051	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000				
13	0.058	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000				
14	0.067	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000				
15	0.076	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000				
16	0.087	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000				
17	0.100	0.000	0.000	48	6.720	0.109	0.109				
18	0.115	0.000	0.000	49	7.697	0.184	0.293				
19	0.131	0.000	0.000	50	8.816	0.317	0.611				
20	0.150	0.000	0.000	51	10.097	0.548	1.158				
21	0.172	0.000	0.000	52	11.565	0.946	2.104				
22	0.197	0.000	0.000	53	13.246	1.627	3.731				
23	0.226	0.000	0.000	54	15.172	2.727	6.458				
24	0.259	0.000	0.000	55	17.377	4.266	10.724				
25	0.296	0.000	0.000	56	19.904	6.539	17.263				
26	0.339	0.000	0.000	57	22.797	9.003	26.266				
27	0.389	0.000	0.000	58	26.111	11.254	37.520				
28	0.445	0.000	0.000	59	29.907	12.694	50.214				
29	0.510	0.000	0.000	60	34.255	12.890	63.204				
30	0.584	0.000	0.000	61	39.234	11.686	74.870				
31	0.669	0.000	0.000	62	44.938	9.240	84.110				

1 / 1

Obr. C-1 Protokol distribuce částic provedené na zařízení Horiba LA-950

ATOMET FeAM

ATOMET FeAM is a high purity iron powder suitable for additive manufacturing applications.

Typical physical properties

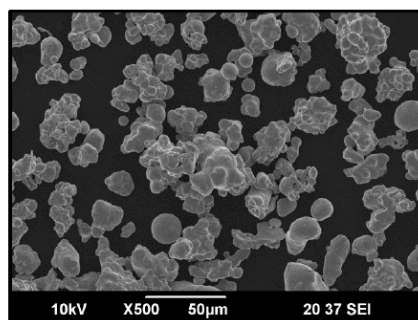
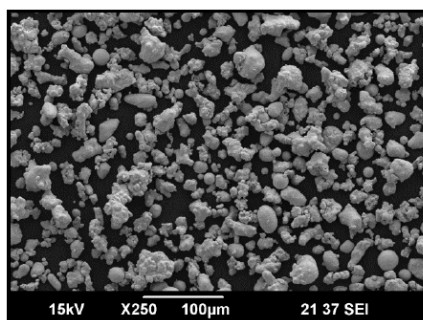
Apparent density	3.10 g/cm ³
------------------	------------------------

Typical chemical composition (%w)

Iron	> 99.5%
Manganese	0.04%
Carbon	0.004%
Oxygen	0.08%
Sulfur	0.007%
Nitrogen	0.004%

Typical particle size distribution

d ₁₀	15 µm
d ₅₀	30 µm
d ₉₀	45 µm
d ₉₉	60 µm

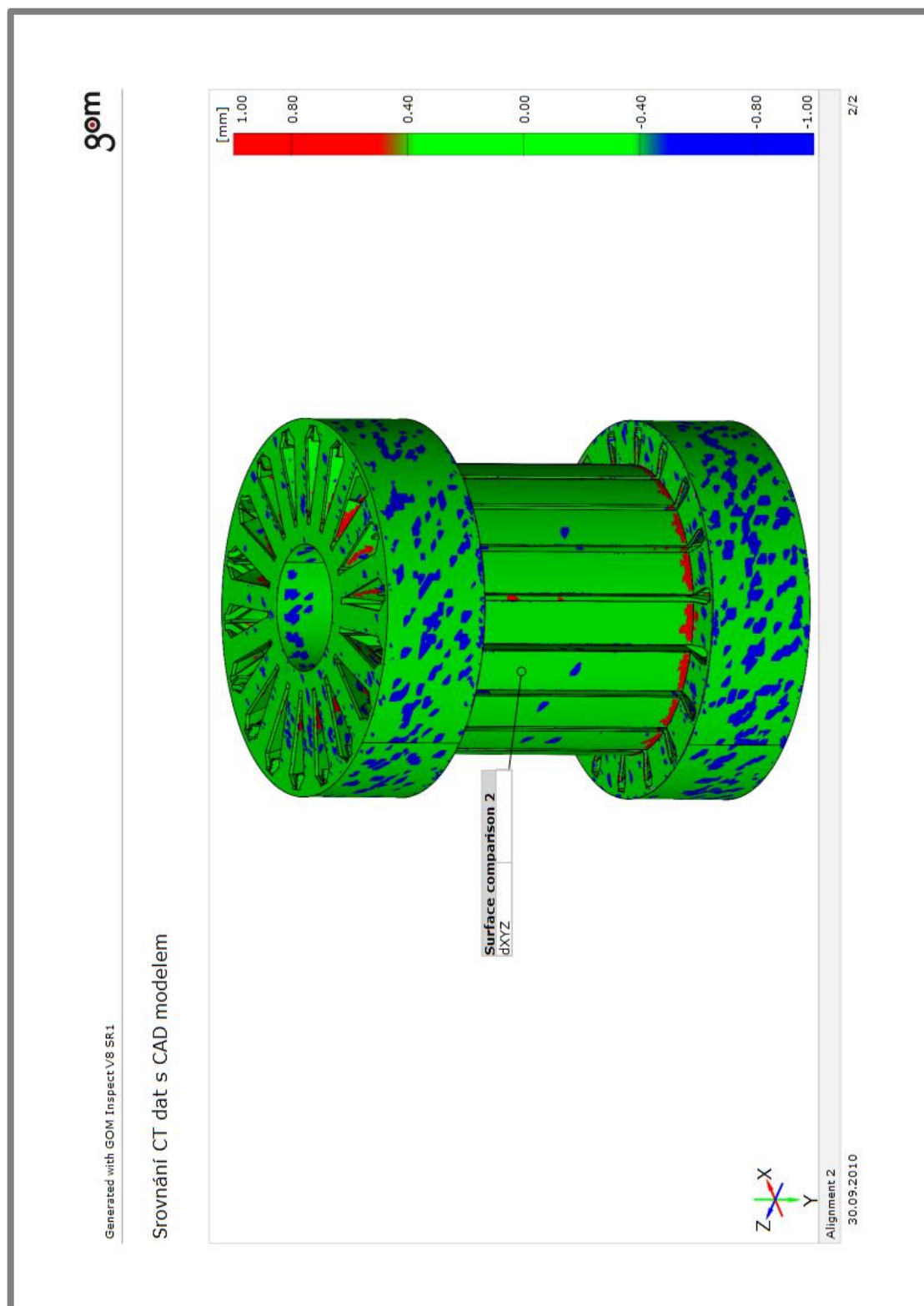


Rio Tinto Metal Powders
1655 Route Marie-Victorin
Sorel-Tracy, QC (J3R 4R4)
Canada

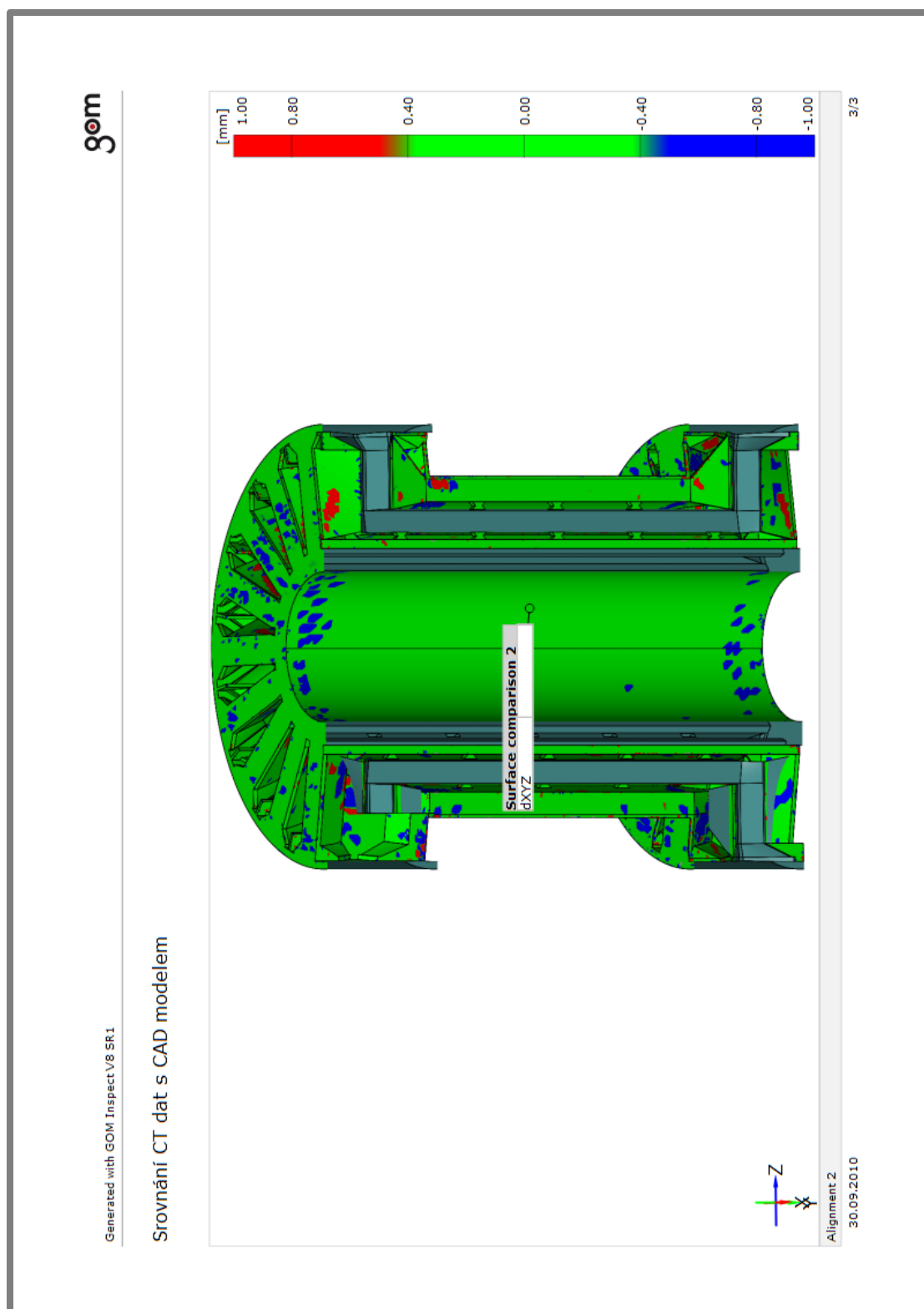
<http://qmp-powders.com/>
info.qmp@riotinto.com
T: +1-450-746-5050

Obr. C-2 Složení a distribuce částic dodané výrobcem prášku

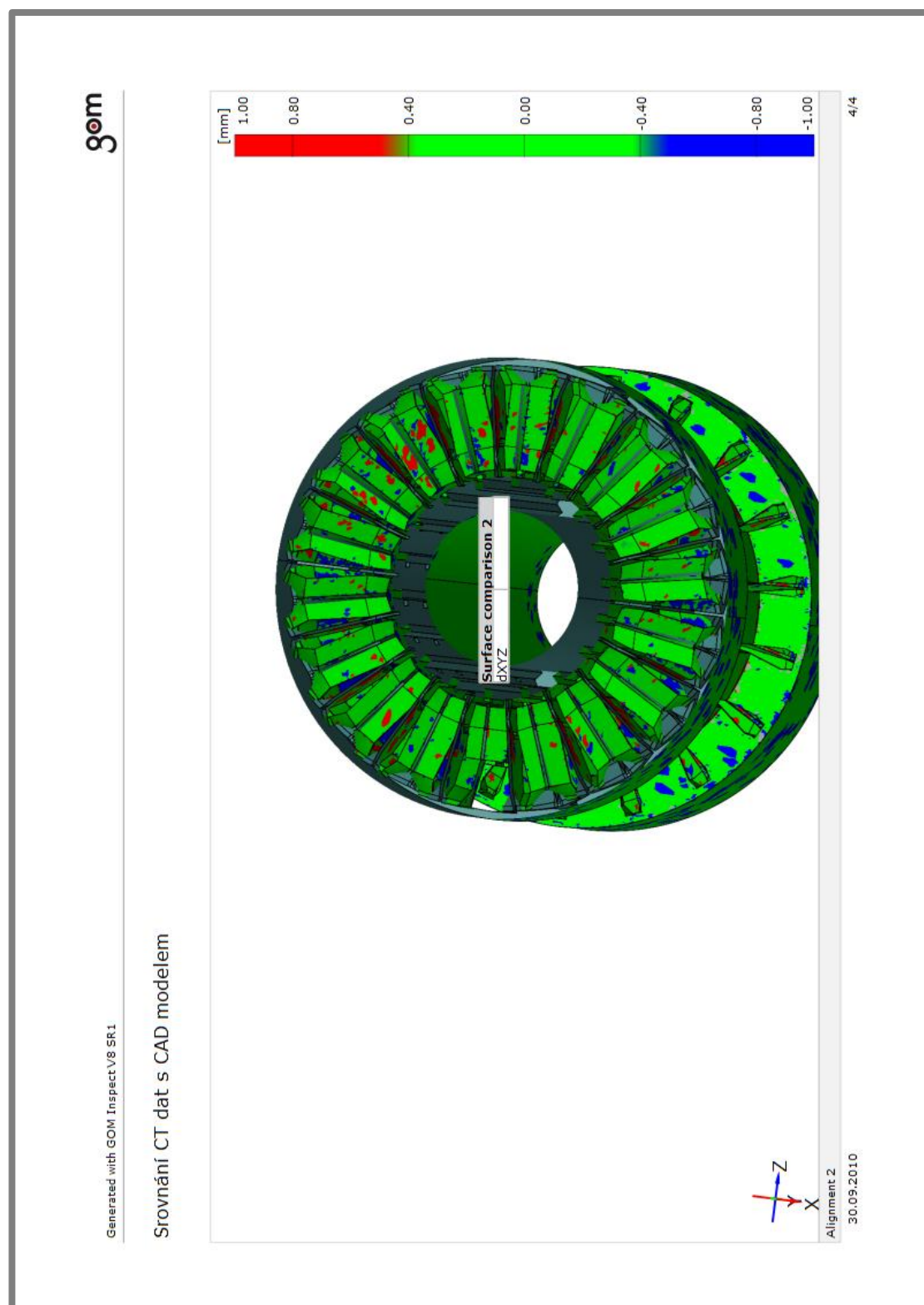
PŘÍLOHA D



Obr. D-1 Srovnání CT dat s CAD modelem

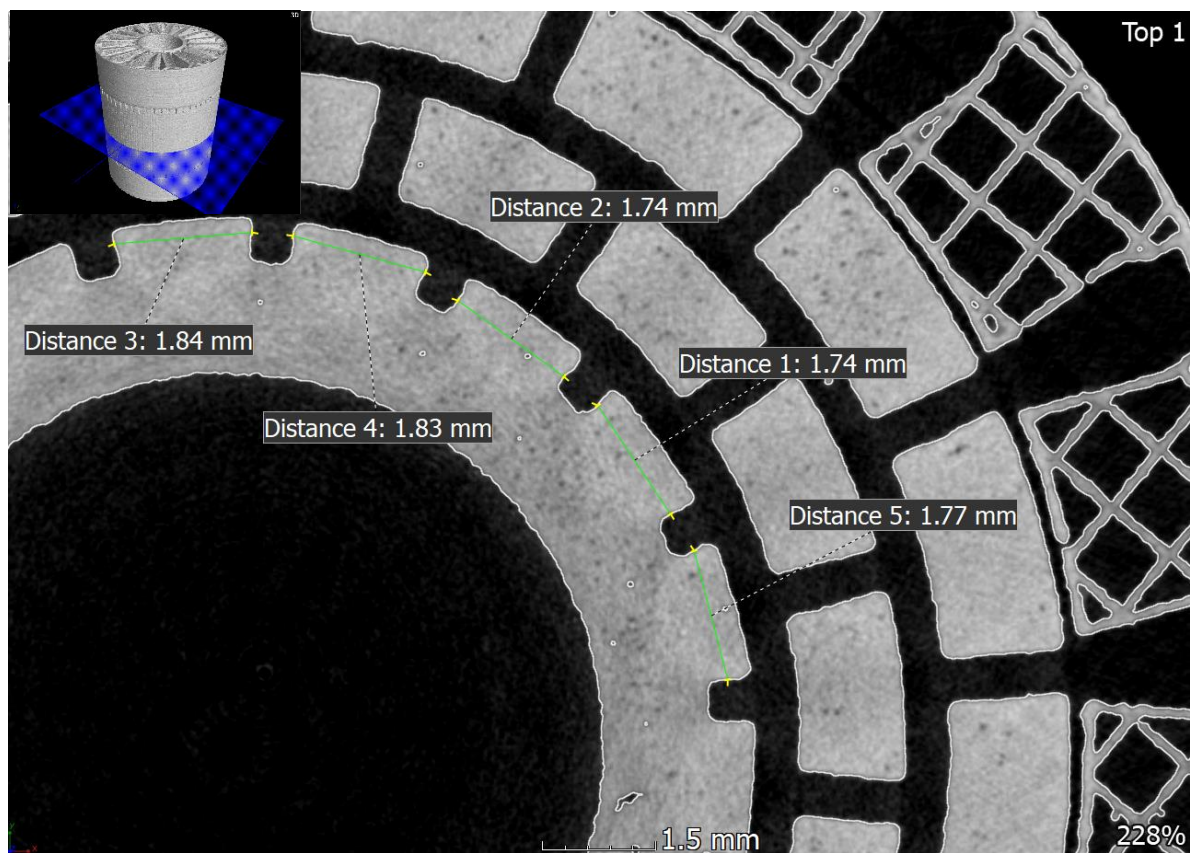


Obr. D-2 Srovnání CT dat s CAD modelem



Obr. D-3 Srovnání CT dat s CAD modelem

PŘÍLOHA E



Obr. E-1 Měření rozměrů objemových prvků na snímcích z CT analýzy

PŘÍLOHA F

Zwick / Roell

17.05.18

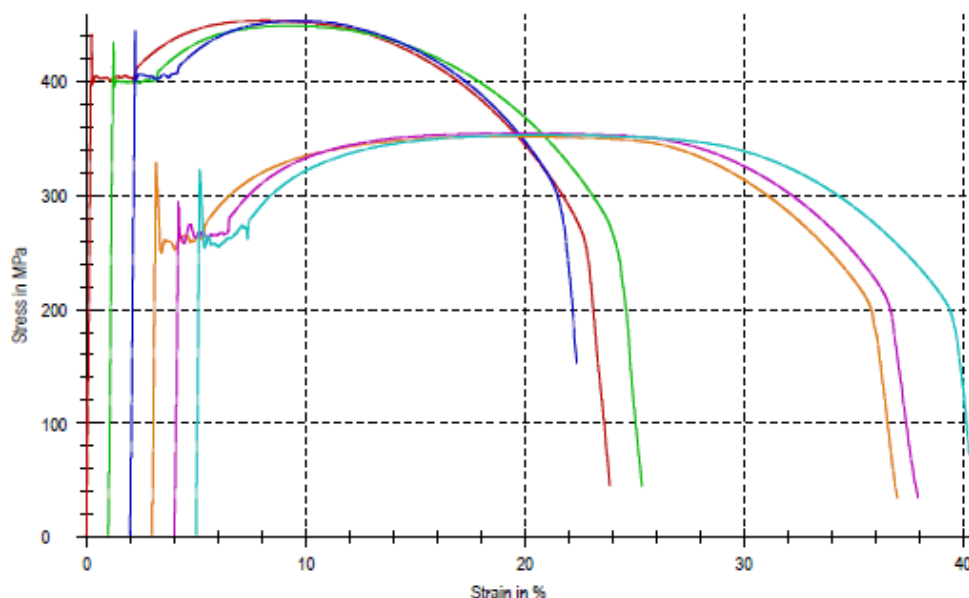
Test report

Customer : DP, ARMADIT
 Test standard : CSN EN ISO 6892-1 (2017)
 Material : Fe (SLM)
 Specimen type : 8x40mm, DIN 50125, Form B
 Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
 Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens
 Pre-load : 2 MPa Speed in the yield range : 1 mm/min
 Speed, E-Modulus : 0,00007 1/s Test speed : 0,001 1/s
 Speed, yield point : 0,00025 1/s

Test results:

Legend	Specimen ID	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	A _g %	F _m N	R _m MPa	R _B MPa	A _g %	A %	Z %
	FZ1-E-1-1	8,006	40,04	194,1	441	397	1,9	22829	453	45	7,9	23,8	71,1
	FZ1-E-1-2	8,043	40,03	196,7	434	395	2,0	22794	449	44	8,1	24,3	73,0
	FZ1-E-1-3	8,011	40,03	205,6	444	401	7,1	22842	453	153	7,4	20,3	64,8
	FZ1-E-2-1	7,942	40,03	205,1	329	250	2,2	17419	352	35	15,9	34,0	75,4
	FZ1-E-2-2	8,002	40,03	184,8	294	258	2,3	17831	355	35	15,5	33,9	75,6
	FZ1-E-2-3	8,004	40,03	209,1	323	254	2,2	17754	353	73	15,5	35,2	76,7

Series graph:



Obr. F-1 Tahová zkouška vyžíhaných (FZ1-E-1-1-3) a nežíhaných (FZ1-E-2-1-3) vzorků